



地铁车站与横跨桥梁耦联破坏数值模拟

董瑞 景立平 单振东 李亚东

Numerical simulation of coupling failure between subway station and cross bridge

Dong Rui, Jing Liping, Shan Zhendong, Li Yadong

引用本文:

董瑞, 景立平, 单振东, 李亚东. 2022. 地铁车站与横跨桥梁耦联破坏数值模拟. *地震学报*[J], 44(1): 50–59. DOI: 10.11939/jass.20210078

Dong R, Jing L P, Shan Z D, Li Y D. 2022. Numerical simulation of coupling failure between subway station and cross bridge. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(1): 50–59. DOI: 10.11939/jass.20210078

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20210078>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于动力有限差分法的典型海域自由场二维地震反应分析

Two dimensional seismic responses of free field in typical seafloor site based on dynamic finite difference method
地震学报. 2020, 42(6): 769–780 <https://doi.org/10.11939/jass.20190191>

流固边界耦合介质高阶有限差分地震正演模拟方法

High-order finite-difference seismic forward modeling method for fluid–solid boundary coupling media
地震学报. 2018, 40(1): 32–44 <https://doi.org/10.11939/jass.20170010>

2010年马乌莱 M_W 8.8地震震后形变三维黏弹性数值模拟

3D numerical model for viscoelastic postseismic deformation following the Maule M_W 8.8 earthquake in 2010
地震学报. 2021, 43(2): 180–193 <https://doi.org/10.11939/jass.20200071>

基于台址构造环境的有限元建模分析—以黔江台为例

Analyses of finite element model based on station's tectonic environment: Taking Qianjiang station for example
地震学报. 2019, 41(1): 80–91 <https://doi.org/10.11939/jass.20170133>

延庆台地电阻率铁质干扰的有限元模拟

The finite element modelling of iron interference on earth resistivity of Yanqing station
地震学报. 2017, 39(4): 520–530 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.04.007>

地震动参数对边坡地震响应的影响规律

Influence law of ground motion parameters on soil slope seismic response
地震学报. 2017, 39(5): 798–805 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.013>

董瑞, 景立平, 单振东, 李亚东. 2022. 地铁车站与横跨桥梁耦联破坏数值模拟. 地震学报, 44(1): 50-59. doi: 10.11939/jass.20210078.

Dong R, Jing L P, Shan Z D, Li Y D. 2022. Numerical simulation of coupling failure between subway station and cross bridge. *Acta Seismologica Sinica*, 44(1): 50-59. doi: 10.11939/jass.20210078.

地铁车站与横跨桥梁耦联破坏数值模拟^{*}

董 瑞^{1,2)} 景立平^{1,2,3), †} 单振东^{1,2,3)} 李亚东⁴⁾

1) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室

2) 中国哈尔滨 150080 地震灾害防治应急管理部重点实验室

3) 中国河北廊坊 065201 防灾科技学院

4) 中国广州 510405 广州大学工程抗震研究中心

摘要 以典型的两层三跨形式地铁车站为研究对象, 采用非线性动力时程反应分析方法, 对软土地基的地铁车站与上部交叉桥梁模型进行数值模拟分析, 给出了一种潜在的地铁车站-桥梁耦联破坏模式, 分析了地铁车站与上部桥梁的地震动力相互作用。数值模拟结果表明: 桥梁对车站的地震响应影响较小, 车站发生破坏主要取决于地震作用及其本身强度; 地铁车站发生破坏后会引起邻近区域土层产生较大的水平和竖向变形, 进而会引起邻近区域地基失效并使桥梁发生落梁破坏; 地铁车站遭地震破坏后, 桥梁基础带动邻近区域的土层整体向车站方向移动, 加剧车站坍塌震害。

关键词 结构-土-结构相互作用 有限单元法 地震反应分析 耦联破坏

doi: 10.11939/jass.20210078 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

Numerical simulation of coupling failure between subway station and cross bridge

Dong Rui^{1,2)} Jing Liping^{1,2,3), †} Shan Zhendong^{1,2,3)} Li Yadong⁴⁾

1) Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

2) Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China

3) Institute of Disaster Prevention, Hebei Langfang 065201, China

4) Earthquake Engineering Research & Testing Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China

Abstract: In this paper, a typical two-story and three-span subway station is taken as the research object. The nonlinear dynamic time-history analysis method is adopted to conduct numerical simulation analysis on the model of the subway station and the upper bridge on soft site. A potential coupling failure mode of subway station and bridge is presented. The seismic interaction between the subway station and the upper bridge is studied. Numerical simulation

* 基金项目 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室开放研究专项(2018D16)、国家重点研发计划(2018YFC1504004)和国家重点研发计划课题(2016YFC0800205)共同资助。

收稿日期 2021-05-22 收到初稿, 2021-07-13 决定采用修改稿。

作者简介 董瑞, 博士, 助理研究员, 主要从事土-结构动力相互作用体系非线性数值模拟方法及破坏机理研究, e-mail: mrdongrui@126.com; [†]景立平, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程和地震工程相关研究, e-mail: jlp_iem@163.com



results show that: the bridge has a little effect on the seismic response of the station, and the damage of the station mainly depends on the earthquake action and structure strength; the destruction of the subway station will cause a large horizontal and vertical deformation of the soil in adjacent areas, resulting in the bridge beam fall; after the destruction of the station, the bridge foundation makes the soil move towards the station, which aggravates the earthquake damage of subway station.

Key words: structure-soil-structure interaction; finite element method; seismic response analysis; coupling damage

引言

由于城市交通的立体化发展,地下轨道交通和城市立交桥交叉修建,地下结构和邻近地面桥梁相互作用,在地震过程中,高烈度地区的地下和地面结构之间存在复杂的动力相互作用,这种地下和地面结构的耦联破坏作用及其破坏机理已成为城市岩土地震工程及防震减灾领域重要的研究课题之一。

针对地下结构与地面结构的地震相互作用已有相关研究。杨书燕等(2007)对矩形隧道下穿地表框架结构和紧邻地表框架结构两个二维有限元模型进行了数值模拟,结果表明:地表建筑紧邻地下结构时地震响应最大;傅玉勇等(2009)对并行圆形隧道与地表框架结构动力相互作用体系进行了二维有限元数值模拟表明:输入水平向地震动时,地下隧道会使邻近地表建筑顶层水平位移放大30%,但输入竖向地震动时影响较小;何伟和陈健云(2012)通过采用二维有限元数值模拟方法研究了不同场地条件下矩形地下结构对地表建筑地震响应的影响,认为地下结构会使得上部区域的地震动减小而使远处区域增大,并且场地土体刚度越小地下结构对地表建筑地震响应的影响越大;郭靖等将地表建筑简化为弯剪梁模型并采用层间位移谱分析方法计算地表建筑的地震响应,分别采用二维有限元数值模型计算矩形地下结构和圆形隧道存在时的地面运动,并以此作为地表建筑弯剪梁模型底部的地震激励分析了矩形地下结构对地表建筑地震响应的影响,其结果表明,地下结构对地表建筑地震响应的影响与地表建筑的自振周期相关(郭靖, 2013; 郭靖, 陈健云, 2013; 郭靖等, 2017);Wang等(2013)通过对ANSYS二次开发使其能在频域内求解,利用该方法对地下结构与地表建筑的三维有限元模型进行了求解,分析出矩形地下结构对邻近低矮结构地震响应的影响更加明显。

上述研究采用的数值模型大多未考虑或仅考虑了部分非线性特征,难以给出实际的结构地震破坏过程,因此尚无法合理给出地下结构与地面结构耦联灾变机理。近些年来,由于数值计算技术的发展,杜修力等(2017, 2018)首次利用三维动力有限元数值模型模拟了大开车站塌毁过程。董瑞(2020)采用非线性数值模型精细地研究了矩形地下结构的地震灾变过程,得到了矩形地下结构的渐进式破坏模式,并指出结构形式(顶板和侧墙的线刚度比)对其地震响应有较大的影响。Xu等(2020)模拟了地下框架结构的破坏过程,认为中柱由于受到高轴压作用而发生完全脆性破坏。

精细的非线性有限元数值模型可以实现对结构地震破坏过程的高度仿真,但针对地下结构与地面结构的耦联灾变过程的模拟鲜有研究。为了研究地铁车站与横跨桥梁耦联破坏机理,本文拟采用非线性动力时程数值模拟方法,对软土地基的地铁车站与上部交叉桥梁模

型进行数值模拟分析。模拟出一种潜在的地铁车站-桥梁耦联灾变模式；并对比弹性工况和弹塑性工况下单一车站模型和车站-桥梁模型的模拟结果，以期分析出地铁车站-桥梁耦联灾变机理，为地下结构与地面结构的选址及抗震设计提供科学依据。

1 计算模型及模拟工况

1.1 计算模型

本文以两层三跨形式地铁车站及其上部横跨的高架桥结构-土-结构相互作用体系为研究对象，其横断面尺寸如图1所示。地铁车站的横断面(宽×高)为21.00 m×12.5 m；侧墙厚度为0.70 m(纵筋配筋率为0.8%)，顶板厚度为0.70 m(纵筋配筋率为1.0%)，底板厚度为0.8 m(纵筋配筋率为1.0%)，中柱直径为0.8 m，中心距为5.0 m，(纵筋配筋率为6.0%，箍筋为直径9 mm；钢筋间距为350 mm)。上部横跨桥梁的桥面宽度为16 m；桥柱高度为8 m，截面尺寸为0.8 m×0.6 m；基础形式为桩基础，每个桥柱下面一根直径为0.6 m的混凝土圆形桩，桩长为11.5 m，承台厚度为0.8 m。

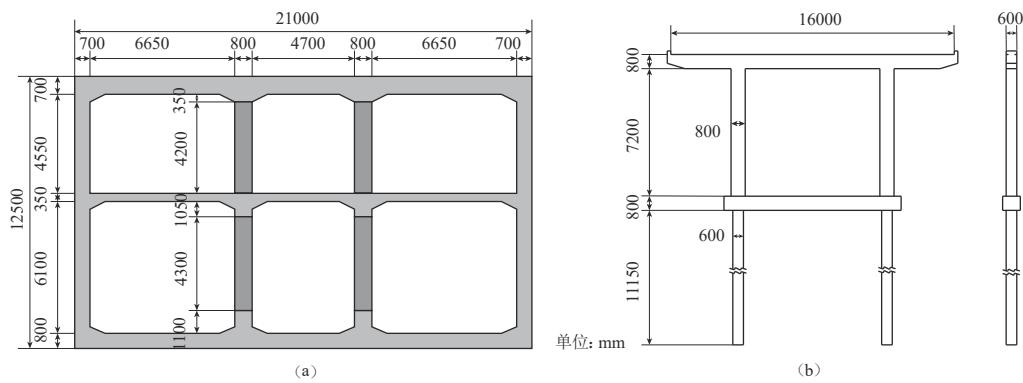


图1 两层三跨地铁车站(a)及高架桥(b)示意图

Fig. 1 Diagram of two-story and three-span subway station (a) and viaduct (b)

根据广州某工程场地勘探资料选取场地土层，土层参数列于表1。土层从上至下分别为素填土层、粉质黏土层、粉细砂层、粉质黏性土层、全风化混合花岗岩层和中风化混合花岗岩层，厚度分别为4.4, 3.5, 3.4, 8.7, 8.1和5.9 m。地铁车站与桥梁相互作用模型剖面如图2所示。车站埋深为5.1 m，邻近车站的桩基础距离车站侧边净距为1.2 m。

表1 场地土层参数

Table 1 Soil parameters of site

土层序号	土层类别	密度/(10^3 kg·m $^{-3}$)	剪切波速/(m·s $^{-1}$)	弹性模量/kPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/°	厚度/m
1	素填土	1.80	24.39	3 000	0.4	10	10	4.4
2	粉质黏土	1.87	27.59	3 700	0.3	18	14	3.5
3	粉细砂	1.85	32.12	5 000	0.31	0	28	3.4
4	粉质黏性土	1.91	34.37	6 000	0.33	25	21	8.7
5	全风化混合花岗岩	1.93	38.37	7 500	0.32	30	23	8.1
6	中风化混合花岗岩	2.50	742.42	3 500 000	0.27	300	35	5.9

在 Abaqus 中建立两层三跨车站与桥梁交叉的有限元模型, 如图 3 所示。土体和混凝土均采用 8 结点 6 面体缩减积分单元进行离散; 钢筋采用 2 结点杆单元进行离散; 采用 Abaqus 中的嵌固模型模拟钢筋和混凝土间的协同工作。根据廖振鹏(2002)给出的离散网格中的波传播条件, 选择土体单元尺寸(长×宽×深)为 2 m×2 m×2 m, 并在地下结构附近进行适当加密处理。

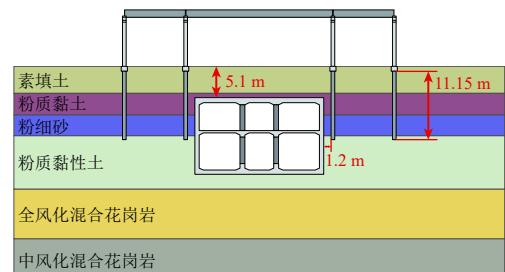


图 2 模型剖面图

Fig. 2 Profiles of model

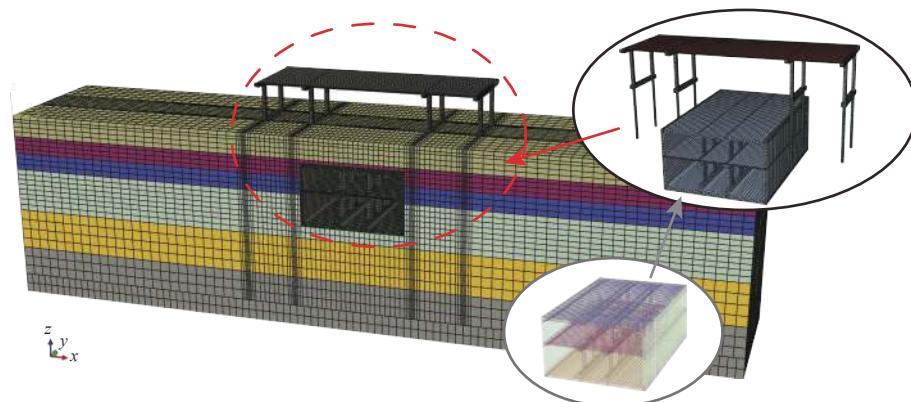


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

根据董瑞(2020)研究结果, 选取模拟人工边界条件为: 底部采用黏性边界, 侧向边界采用自由度绑定边界(tied degrees of freedom, 缩写为 TDOF)(Doltsinis, 1989), 即分别在 x 和 y 向两组侧边界处设置位移约束条件使对应节点的位移协调; 为保证计算精度, 车站-桥梁模型土体计算范围为 147 m×30 m×34 m。在 Abaqus/Explicit 模块中, 黏性边界采用无限元(CIN3D8), 绑定边界采用多点约束(multi-point constraints, 缩写为 MPC)方式实现。混凝土结构和周围土体间的摩擦滑移通过 Abaqus 中的接触面模型模拟, 法向采用“硬接触”, 切向采用摩擦接触($\mu=0.4$)。

1.2 本构模型

土体本构模型采用基于 Montáns (2000) 模型提出的改进边界本构模型(Dong *et al.*, 2020), 这一模型已经被二次开发并可以用于通用有限元软件 Abaqus。该模型在归一化偏平面内建立屈服函数; 并采用土体材料模型与围压的经验公式描述围压改变引起土体模量变化; 根据偏应力不变量建立应力等效关系, 将一维滞回本构(Pyke)模型拓展到三维应力空间并推导塑性模量。归一化偏平面如图 4 所示, 边界面(即 Mises 强度面)在归一化偏平面中的投影为一个圆, 其方程可以表示为:

$$F = \frac{3}{2} \mathbf{m}_{p,ij} \mathbf{m}_{p,ij} - m_c^2 = 0, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{m}_{p,ij}$ 表示投影点在一般应力空间内的 i, j 两个方向上的应力张量($i, j=1, 2, 3$ 表示空

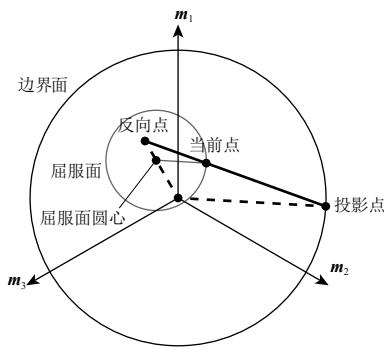


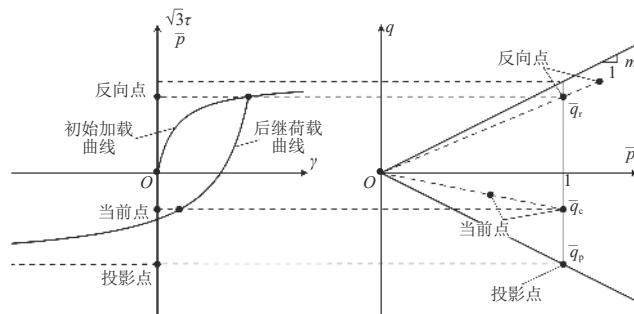
图 4 归一化偏平面内边界面及投影法则

Fig. 4 Bounding surface and mapping law in normalized deviatoric plane

式中: τ 表示剪应力, τ_p 和 τ_r 分别为投影点和反向点的剪应力; $d\gamma$ 为工程剪应变增量; 初始剪切模量 G 采用经验公式计算

$$G = kP_a \left(\frac{p}{P_a} \right)^n, \quad (3)$$

式中, G 表示最大剪切模量, P_a 表示一个标准大气压强, k 和 n 为与土性相关的材料常数.

图 5 应力等效关系. 图中 q 为偏应力, \bar{q} 为等效偏应力Fig. 5 Equivalent relation of stress. q is deviatoric stress, and \bar{q} is equivalent deviatoric stress

根据塑性模量和偏应力增量可以表示为 (Dong *et al.*, 2020):

$$K_p = 12G(m_c \bar{p}_p)^2 \frac{(1-\eta)^2}{1-(1-\eta)^2}, \quad (4)$$

$$ds_{c,ij} = 2Gde_{ij} - \frac{3G[1-(1-\eta)^2]}{m_c^2} (\mathbf{m}_{p,kl} de_{kl}) \mathbf{m}_{p,ij}. \quad (5)$$

式中: e 表示应变张量; k 和 l 取值为 1, 2, 3, 表示空间内 x, y, z 方向.

地铁车站混凝土材料采用 Abaqus 材料库中的混凝土塑形损伤 (concrete damaged plasticity, 缩写为 CDP) 模型进行模拟, 钢筋采用理想弹塑性材料模拟; 混凝土强度等级为 C30, 钢筋强度等级为 HRB335. CDP 模型的计算参数列于表 2, 混凝土材料屈服强度及损伤因子随非弹性应变的变化关系如图 6 所示; 假定桥梁已经按照规范进行了完善的抗震设计,

间内 x, y, z 方向), $m_c = 6\sin\phi/(3-\sin\phi)$ 为边界的半径. 图 4 中的 \mathbf{m}_i 为与 \mathbf{m}_j 对应的主应力空间内的归一化应力张量, 其中 $\mathbf{m}_i = \mathbf{s}_i/\bar{p}$, $\bar{p} = p + c/\tan\phi$ 为等效围压, p 为围压, c 为黏聚力, ϕ 为内摩擦角.

基于第二偏应力不变量的应力状态等效关系如图 5 所示. 根据应力状态参量 η 可将一维滞回本构模型拓展到三维应力空间. 增量形式的一维滞回本构模型可以表示为

$$d\tau = G \left(1 - \frac{\tau_r - \tau}{\tau_p + \tau_r} \right)^2 d\gamma, \quad (2)$$

表 2 CDP 模型材料参数
Table 2 Parameter of CDP model

弹性模量/GPa	泊松比	剪胀角/°	偏心率	双轴与单轴抗压强度比值	屈服面形态的参数K	黏性系数	损伤发展
30	0.2	30	0.1	1.16	0.666 7	0.000 5	见图6

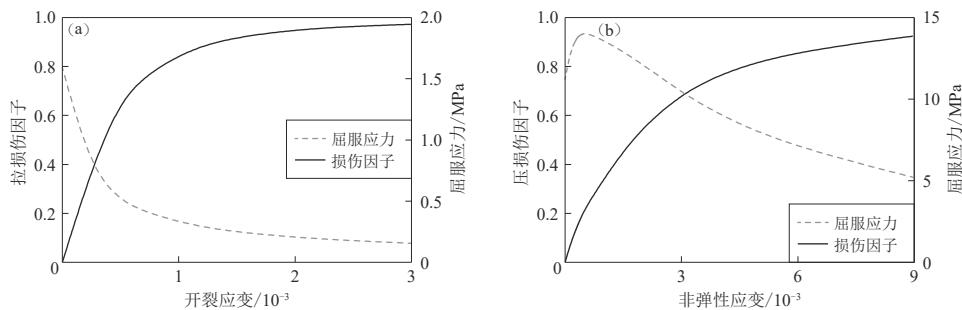


图 6 混凝土拉伸(a)和压缩(b)损伤发展

Fig. 6 Development of tensile damage (a) and compression damage (b) for concrete

因此可以忽略桥梁桩基础、桥柱和梁板的强度破坏, 模拟时桥梁采用弹性模型并施加阻尼比为5%的质量相关阻尼模拟材料耗能特性, 桥梁材料密度为2 500 kg/m³, 弹性模量为30 GPa, 泊松比为0.2; 桥梁支座和梁板间设置接触模拟支座, 法向采用“硬接触”, 切向采用摩擦接触, 桥梁支座和梁板间的摩擦系数取为0.4.

1.3 模拟工况

选择1995年阪神地震的Kobe波的南北分量和竖直分量(图7)作为输入地震波地震; 分别选取有限元模型中x向(地铁车站横断面方向)和z向(竖直方向)作为水平地震动和竖直地震动输入方向, 将水平方向分量和竖直方向分量调幅为0.4g和0.3g, 以此模拟在强震作用下地铁车站的地震响应.

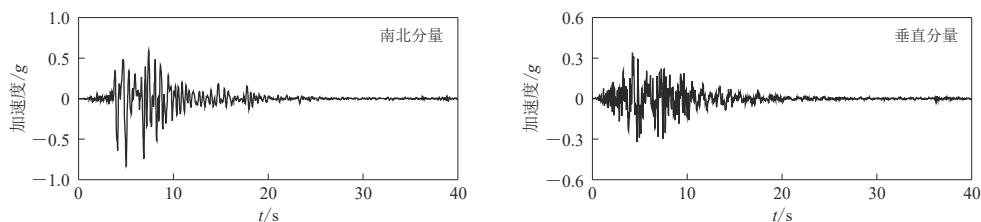


图 7 阪神地震中神户海洋气象台记录

Fig. 7 Ground motion record at the Kobe marine observatory during the Hanshin earthquake

针对单一车站模型和车站-桥梁模型, 分别进行车站为弹性模型和弹塑性模型情况下的动力时程反应分析, 并依据上述两组模型模拟结果对比研究桥梁和地铁车站间的相互作用机理及耦联破坏机制. 弹塑性工况P-1模拟了桥梁和地铁车站耦联破坏的震害现象, 并与单一车站(P-2)的破坏模式进行对比给出桥梁和地铁车站间的耦联破坏机制. 弹性工况E-1和E-2用于分析在未发生破坏的条件下, 邻近车站的桥梁基础与车站的相互作用, 进一步解释桥梁-车站耦联破坏机制. 数值模拟工况如表3所示.

表 3 数值模拟工况
Table 3 simulated Working condition

工况	计算模型	地铁车站 本构模型	输入地震动		工况	计算模型	地铁车站 本构模型	输入地震动	
			水平/g	竖向/g				水平/g	竖向/g
P-1	车站-桥梁	CDP	0.4	0.3	E-1	车站-桥梁	黏弹性	0.4	0.3
P-2	单一车站	CDP	0.4	0.3	E-2	单一车站	黏弹性	0.4	0.3

2 有限元模拟结果分析

2.1 地铁车站-桥梁耦联灾变模拟结果

车站-桥梁模型(P-1工况)4个关键时刻的水平位移与车站混凝土压损伤如图8所示,可以看出:当 $t=0-7$ s时,地铁车站中柱混凝土在双向地震动作用下损伤逐渐发育,但地铁车站和桥梁均未发生破坏;当 $t=7-8$ s时,地铁车站中柱混凝土损伤进一步发育,下层左侧柱子首先发生屈曲破坏;当 $t=8-11$ s时,地铁车站下层左侧中柱失效后,顶板和楼板失去中柱约束发生破坏,顶板和楼板失效后,侧墙无法承受两侧土压力的作用而向车站内侧坍塌;当 $t=11-15$ s时,地铁车站破坏后,邻近桥梁基础随土层向车站方向产生较大变形,进而产生了“落梁”破坏.

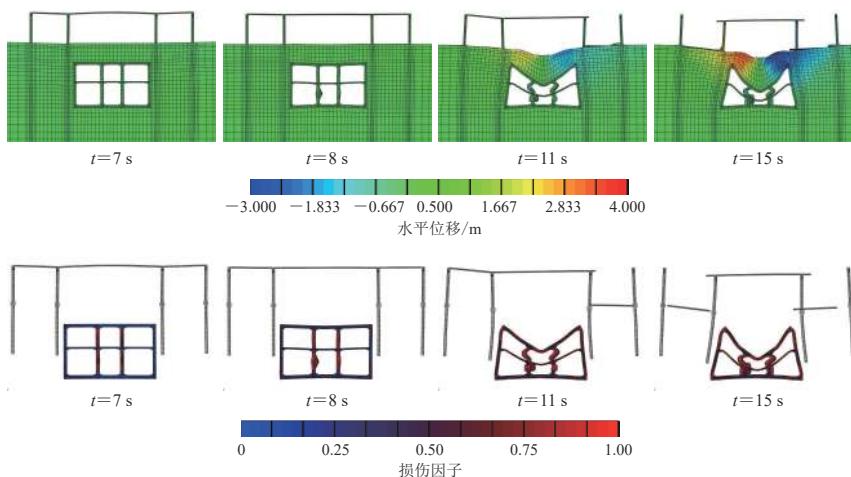


图 8 车站-桥梁模型 4 个关键时刻的水平位移及车站混凝土压损伤因子云图
Fig. 8 Nephogram of horizontal displacement and compression damage of station concrete for station-bridge model at four key moments

2.2 地铁车站-桥梁耦联破坏机理

地震荷载作用下地下结构受到周围土体的约束而发生剪切变形,地下结构的层间位移可以反应地下结构受到的地震荷载作用大小. 图9给出弹性工况(E-1和E-2)和弹塑性工况(P-1和P-2)在结构破坏前(3—7 s)地铁车站上下两层在左侧、中部和右侧的层间相对位移. 单一车站模型和车站-桥梁模型计算得到的车站层间位移基本一致. 由此可知,在地铁车站未破坏时,桥梁对车站的地震响应影响很小.

车站-桥梁模型(P-1工况)和单一车站模型(P-2工况)地铁车站破坏后引起邻近区域土层

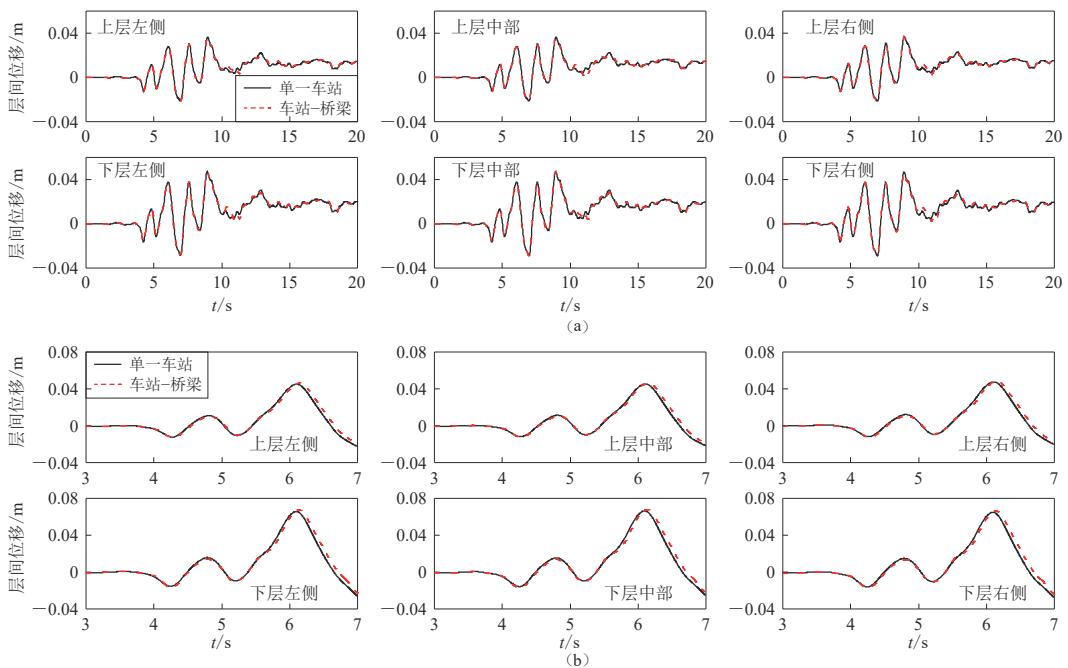


图 9 地铁车站层间相对位移

(a) 弹性工况; (b) 弹塑性工况(3—7 s)

Fig. 9 Relative displacement of subway station

(a) Elastic condition; (b) Elastic-plastic condition (3—7 s)

永久变形(变形放大比例为1),如图9所示.图中显示了车站楼板($D=-11.3$ m)位置水平位移等值线,单一车站模型左右两侧水平位移等值线与水平方向夹角分别为 38.26° 和 42.94° ,车站-桥梁模型左右两侧水平位移等值线与水平方向夹角分别为 42.90° 和 43.00° .

两模型在地表($D=0$ m)、车站顶板($D=-5.1$ m)和车站楼板($D=-11.3$ m)位置的土层永久变形分布曲线,如图11所示.车站-桥梁模型得到的车站邻近区域土层永久位移大于单一车站模型,桥梁会加剧车站破坏引起的地基变形以及其影响范围.结合图10和图11的结果可知,桥梁不会改变地铁车站的破坏形式;但是由于桥梁的基础对土层存在一定的加固效果使得车站两侧土体整体向车站移动,进而加剧了车站-桥梁系统的震害.

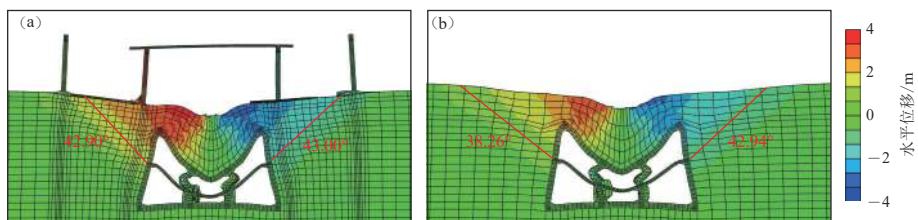


图 10 车站邻近区域土层永久水平位移图

(a) 车站-桥梁模型; (b) 单一车站模型

Fig. 10 Nephogram of soil permanent horizontal displacement near subway station

(a) Station-bridge model; (b) Single station model

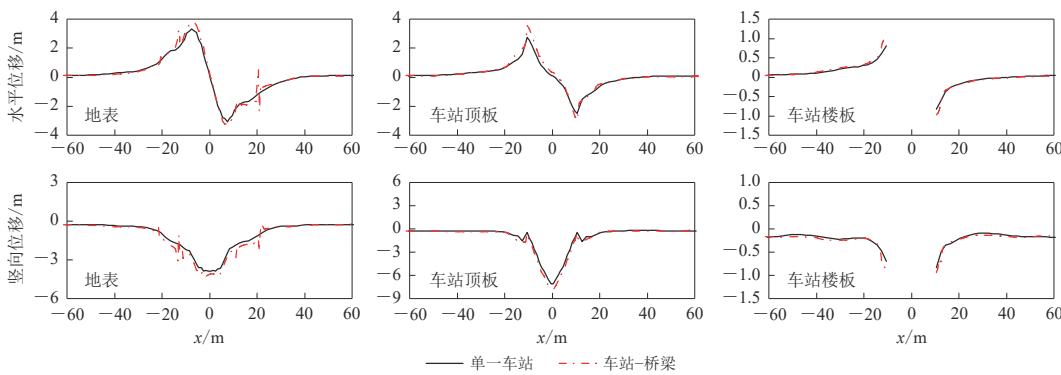


图 11 地表、车站顶板和车站楼板位置处的土层永久位移

Fig. 11 Permanent horizontal displacement of soil at the depths of soil surface, station roof and station floor

3 讨论与结论

本文通过对软土场地的单一两层三跨车站以及其与邻近桥梁耦联相互作用模型进行非线性动力时程反应分析, 模拟了一种可能的地铁车站-桥梁模型耦联破坏模式。并通过对比分析桥梁对弹性地铁车站模型(E-1工况和E-2工况)和弹塑性地铁车站模型(P-1工况和P-2工况)地震响应的影响, 对地铁车站与桥梁的耦联破坏机制进行了分析, 得出如下结论:

1) 依托Abaqus强大的大变形模拟计算能力, 并采用本文给出的土体非线性本构模型, 可以实现对地下结构与地面结构复杂耦联破坏过程的仿真模拟, 地铁车站发生破坏后会引起邻近区域土层发生较大的水平和竖向变形, 地铁车站的破坏会引起邻近区域地基失效并使桥梁发生“落梁”破坏。

2) 分别根据弹性模型和弹塑性模型(未破坏阶段)模拟结果, 对比单一地铁车站和地铁车站-桥梁模型得到车站响应, 可知桥梁对车站的地震响应影响较小, 车站发生破坏主要取决于地震作用以及其本身强度。

3) 地铁车站-桥梁耦联破坏主要表现为地铁车站破坏后桥梁基础失效形式的“次生”灾害, 在车站破坏后, 桥梁基础会带动临近区域土层整体向车站方向移动, 增大周围土层永久变形的范围, 加剧车站坍塌灾害。

需要说明的是, 对地下结构地震破坏过程的模拟是一个高度非线性的问题, 此类问题的非线性主要表现为几何非线性和材料非线性两个方面, 选取合适的数值模型描述上述两种非线性是仿真模拟破坏过程的关键。针对几何非线性问题, 本文采用的Abaqus能够实现对单元网格大变形的模拟; 针对材料非线性问题, 本文采用基于边界面理论建立的土体弹塑性本构模型, 在该模型中引入了模量随围压变化的经验公式, 可以更合理的描述地下结构两侧土体围压改变引起的土体非线性响应。

综上所述, 本研究利用了一种可以模拟地下结构和地面结构耦联灾变过程的方法, 并通过对地铁车站-桥梁相互作用模型地震灾变过程的仿真模拟结果, 得出了地铁车站和邻近桥梁的耦联灾变机理, 研究成果对于城市地下结构选址及抗震设计具有一定的参考意义。

参 考 文 献

- 董瑞. 2020. 地铁车站-桥梁耦联地震破坏机理及数值模拟[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 1-104.
- Dong R. 2020. *Coupled Failure Mechanism of Subway Station-Bridge and Seismic Response Numerical Simulation*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 1-104 (in Chinese).
- 杜修力, 马超, 路德春, 许成顺, 许紫刚. 2017. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析[J]. 土木工程学报, **50**(1): 53-62.
- Du X L, Ma C, Lu D C, Xu C S, Xu Z G. 2017. Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Daikai subway station under seismic loads[J]. *China Civil Engineering Journal*, **50**(1): 53-62 (in Chinese).
- 杜修力, 李洋, 许成顺, 路德春, 许紫刚, 金浏. 2018. 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*, **40**(2): 223-236.
- Du X L, Li Y, Xu C S, Lu D C, Xu Z G, Jin L. 2018. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe earthquake[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **40**(2): 223-236 (in Chinese).
- 傅玉勇, 闫澍旺, 胡子学. 2009. 层状场地中地铁隧道对邻近建筑物地震反应的影响[J]. 建筑结构, **39**(11): 46-49.
- Fu Y Y, Yan S W, Hu Z X. 2009. Effect of tunnels on earthquake response of ground and buildings along the subway in layered site[J]. *Building Structure*, **39**(11): 46-49 (in Chinese).
- 郭靖. 2013. 地下结构动力变形分析及其对地表建筑地震响应的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学: 1-155.
- Guo J. 2013. *The Dynamic Deformation Analysis of Underground Structures and its Influence on Seismic Response of Adjacent Surface Buildings*[D]. Dalian: Dalian University of Technology: 1-155 (in Chinese).
- 郭靖, 陈健云. 2013. 均质地基地铁车站对临近建筑层间位移角的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, **40**(8): 40-45.
- Guo J, Chen J Y. 2013. Influence of subway station buried in homogeneous foundations on the inter-story drift ratio of adjacent structures[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, **40**(8): 40-45 (in Chinese).
- 郭靖, 陈健云. 2017. 隧道对地表临近既有建筑物层间位移影响分析[J]. 地下空间与工程学报, **13**(3): 765-772.
- Guo J, Chen J Y, Yu L. 2017. Influence of tunnel on inter-story drift of adjacent structures[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, **13**(3): 765-772 (in Chinese).
- 何伟, 陈健云. 2012. 地表建筑对地下车站结构地震响应的影响[J]. *振动与冲击*, **31**(9): 53-58.
- He W, Chen J Y. 2012. Influence of ground surface building on seismic response of underground station structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **31**(9): 53-58 (in Chinese).
- 廖振鹏. 2002. 工程波动理论导论[M]. 第2版. 北京: 科学出版社: 213-231.
- Liao Z P. 2002. *Introduction to Wave Motion Theories in Engineering*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press: 213-231 (in Chinese).
- 杨书燕, 姜忻良, 李新国. 2007. 隧道对临近建筑物的地震反应影响分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), **39**(3): 41-46.
- Yang S Y, Jiang X L, Li X G. 2007. Analysis on seismic response effect of tunnel to nearby structure[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, **39**(3): 41-46 (in Chinese).
- Dong R, Jing L P, Li Y Q, Yin Z Y, Wang G, Xu K P. 2020. Seismic deformation mode transformation of rectangular underground structure caused by component failure[J]. *Tunn Undergr Space Technol*, **98**: 103298.
- Doltsinis I S. 1989. Advances in computational nonlinear mechanics[G]//*Earthquake Input Definition and The Trasmitting Boundary Conditions*. Vienna: Springer: 109-133.
- Montáns F J. 2000. Bounding surface plasticity model with extended masing behavior[J]. *Comput Methods Appl Mech Eng*, **182**(1/2): 135-162.
- Wang H F, Lou M L, Chen X, Zhai Y M. 2013. Structure-soil-structure interaction between underground structure and ground structure[J]. *Soil Dyn Earth Eng*, **54**: 31-38.
- Xu C S, Zhang Z H, Li Y, Du X L. 2020. Validation of a numerical model based on dynamic centrifuge tests and studies on the earthquake damage mechanism of underground frame structures[J]. *Tunn Undergr Space Technol*, **104**: 103538.