

•水利与土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400229



本刊网刊

基于设定地震的近断层地铁车站结构宽频地震响应分析

吴孟桃¹,王 斌¹,巴振宁^{2*},戴靠山¹,梁建文²

(1. 四川大学 土木工程系, 四川 成都 610207; 2. 天津大学 土木工程系, 天津 300354)

摘 要:本文针对断层-车站全过程响应模拟,在前期提出的频率波数域-谱元-有限元(FK-SE-FE)强耦合三步法的基础上,进一步引入结合低频确定性成分和高频随机扰动的运动学混合震源模型,实现了基于设定地震的近断层地铁车站结构宽频地震响应分析。以天津市地铁地下车站为例,从现有轨道交通线网中选取6个重要站点作为研究对象,建立了考虑土-结构动力相互作用的地铁车站结构精细化有限元模型;以天津南隐伏断裂为背景,基于目标地区的活动断层探测、地震危险性评价和岩土勘探钻孔数据等资料,构造了目标断层的运动学混合震源模型和区域地下速度结构,给出了设定 M_w 6.1级地震下车站所在场地的0~10 Hz地震动幅值及波形特征;将合成的宽频地震波作为土层-车站系统的多维多点地震动输入,从变形云图、最大层间位移角和侧墙相对位移等多个角度比较了不同车站的动力响应。结果表明:本文研究方法能够反映不同车站场地地震动的空间差异,可评估潜在地震发生时近断层地铁车站结构的破坏风险,为相关场地区域内的地下交通抗震设防提供参考。

关键词:设定地震;地震波传播;混合震源模型;地铁车站;全过程响应

中图分类号:TU435;TU311.3

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)02-0253-14

改革开放40余年来,中国经济持续较快发展,工业化城镇化快速推进。近10年间,城市人口显著增加,中国正处于城镇化高速发展时期^[1]。对地下空间的开发利用是实现城市可持续发展的必然选择和重要途径。对城市地下基础设施(如地铁车站、地下隧道、综合管廊等)的建设已成为城镇化进程的关键支撑^[2]。然而,中国地处环太平洋地震带,频繁的地震活动给这些地下结构的安全运维带来了巨大挑战。许多重大工程因临近或跨越活动断裂带,致使地震动幅值更大、空间差异性更显著,极大增加了地震破坏风险水平^[3-4]。地铁地下车站,具有旅客集散地和列车调度点等重要功能,因而针对近断层区域该类结构的抗震安全性研究已成为地震工程领域的重要课题。

自1995年日本阪神大地震以来,地下结构的抗震问题逐渐受到学界重视^[5]。许多学者对地铁车站结构的成灾机理和破坏过程进行了研究,相关研究方法主

要包括原位观测法、理论解析法、模型试验法和数值模拟法^[6-7]。已有研究取得了丰硕成果,并形成一些共识,例如:地下结构和地上结构在抗震性能、分析方法和设计思想上均存在显著区别^[8];在周围土体约束条件下,地下结构的地震动响应主要由场地土体变形控制^[9];地下结构变形分析需要考虑行波效应引起的非一致地震动输入^[10-11]等。同时,随着近些年计算技术的快速发展,近断层地震动作用下地下结构的计算分析研究成为关注热点,例如:Qiu等^[12]从北岭地震中选取具有代表性的近断层地震记录,研究了速度脉冲和高频波幅对土-车站结构系统地震响应的影响机制;Jiang等^[13]基于实测地面运动数据集,分析了近断层地震动作用下地铁车站的地震易损性;崔臻等^[14]利用一种人工合成近断层地震动时程方法,模拟了大型地下洞室群的近场地震反应及其稳定性;Zhao等^[15]针对跨断层地下隧道,采用有限元软件ABAQUS研究了破裂断层附近隧道响应的脉冲关键参数;何伟等^[16]结合黏

收稿日期:2024-04-02 修回日期:2024-05-31 网络出版日期:2024-07-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52308513;52178495);国家资助博士后研究人员计划(GZB20230487);四川省科技计划项目(24NSFSC2962);中央高校基本科研业务经费项目(2024SCU12052)

作者简介:吴孟桃(1993—),男,副研究员,博士.研究方向:地震工程与工程波动. E-mail: mtwu@scu.edu.cn

*通信作者:巴振宁,教授, E-mail: bazhenning_001@163.com

弹性边界的人工波基岩输入,开展了竖向地震动对软土地铁隧道地震响应的分析;张海等^[17]基于增量动力分析方法,考察了近断层地震动特性和场地土特性对综合管廊抗震性能的影响。以上研究证实:由于方向性效应、滑冲效应、上盘效应和显著竖向地面运动等因素的影响,相同幅值的近断层地震动较远场情况会对工程结构造成更大威胁。

值得注意的是,上述对于地下结构地震反应的研究中,所采用的波动输入多依赖于某一区域的历史地震记录或规范反应谱建议的人工地震波。这一做法虽然为抗震评估提供了便利,但在反映不同地域地震动的复杂实际特性和物理本质上仍存在明显不足,未能综合考虑震源过程、传播路径和局部场地条件带来的地震动时空场差异^[18-19]。此外,在近断层区域,地下结构周围土体中地震波传播机制以及土-结构动力相互作用机理更为复杂^[20],这也进一步影响到地铁车站等地下结构的地震响应。贾俊峰等^[21]指出,将现有的近断层地震记录用于抗震设计还远远不够,未来在结构抗震评估中,有必要结合迅速发展的断层破裂理论和三维数值建模技术,以更好地研究近断层地震动特征及其对工程结构的影响。因此,亟需利用确定性物理模拟方法构建震源-路径-场地耦合的强地震动场,进而将模拟地震动作为输入以评估近断层场地中地铁车站结构的抗震性能,实现断层-车站全链条情景构建。

本文针对断层-车站全过程响应进行模拟,在吴孟桃等^[22]提出的频率波数域-谱元-有限元(FK-SE-FE)强耦合三步法的基础上,进一步引入结合低频确定性成分和高频随机扰动的运动学混合震源模型,实现基于设定地震的近断层地铁车站结构宽频地震响应分析。

1 断层-车站全过程响应模拟方法

1.1 地震波传播模拟

基于域缩减思想和强耦合分析框架,以频率波数域-谱元法(FK-SEM)混合模拟震源至场地的地震波传播,以谱元-有限元法(SEM-FEM)混合模拟场地至结构的地震波传播。震源-场地-结构全过程响应求解示意如图1所示。将整体物理模型划分为背景域、缩减域 I 和缩减域 II,分别采用FK求解、SEM模拟和FEM计算完成。FK-SE-FE混合方法能够实现从震源破裂到结构反应的全过程分析,有效考虑地震情景链中的若干关键物理过程:1)震源破裂模式;2)区域地壳介质传播;3)局部场地效应;4)土-结构相互作用。该方法有助于开展基于物理机制的重大基础设施地震风险分析及其应用研究。具体实施

步骤如下:

步骤1针对背景域,在假设局部不规则体不存在的情况下,采用基于动力刚度矩阵结合积分变换的FK方法,以精确求解埋置内源所诱发的宽频自由波场的动力历程。

步骤2针对缩减域 I,基于Stacey/PML吸收边界和区域缩减法输入技术,采用SEM高效模拟三维复杂地形地貌条件下的地震波场。

步骤3针对缩减域 II,基于黏弹性边界和人工边界子结构法输入技术,采用FEM精细计算各类工程结构的弹塑性地震响应。

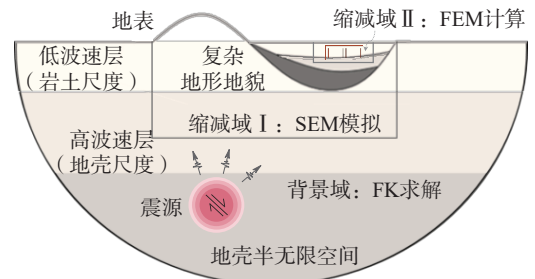


图1 震源-场地-结构全过程响应求解示意

Fig. 1 Schematic of the full-process response solution for source-site-structure interaction

关于方法的详细理论介绍见文献[22],但该文献仅以点震源为例进行了全过程模拟,本文则进一步拓展至有限断层震源。

有限断层震源模型如图2所示。

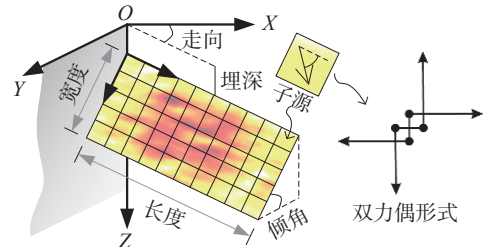


图2 有限断层震源模型

Fig. 2 Finite-fault source model

为计算地壳半无限空间中有限断层震源的地震反应(自由波场),以正北(X轴)、正东(Y轴)和竖直向下(Z轴)方向建立地表坐标系,原点为断层左上角在地表的投影。根据位移表示定理^[23],有限尺度断层S破裂引起的地面位移 $u_i(\mathbf{x}, t)$ 可表示为:

$$u_i(\mathbf{x}, t) = \iint_S \mathbf{m}_{jk}(\xi) * g_{ij,k}(\mathbf{x}, t, \xi, 0) dS(\xi) \quad (1)$$

式中, i 为三维位移场的第 i 个分量, t 为时间, $\mathbf{m}_{jk}(\xi)$ 为断层面上 ξ 位置处地震矩强度密度张量 (j,k) 的力偶分量,*为卷积符号, $g_{ij,k}(\mathbf{x}, t, \xi, 0)$ 为 ξ 位置处单位强度点震源在观测点 $\mathbf{x}$ 产生的动力响应(即点源格林函数^[24-26])。

将整个破裂面划分为若干个等大的子断层(多为

矩形),得到 N 个子断层单元。设 L 为断层的走向长度(沿 X 方向), W 为倾向宽度(沿 Y 方向), $\bar{A}$ 为子断层的面积,则子断层的个数 N 定义为:

$$N = \frac{LW}{\bar{A}} \quad (2)$$

当子断层面积足够小时(取决于被考虑的波长和震源距),可将每一子断层近似为位于子断层中心的独立位错点源,则 $u_i(\mathbf{x}, t)$ 可进一步表示为多个离散子源作用的叠加:

$$u_i(\mathbf{x}, t) = \sum_{n=1}^N m_{jk}(\xi_n) \cdot \bar{A}^* g_{ij,k}(\mathbf{x}, t, \xi_n) \quad (3)$$

式中: n 为子断层的编号索引, $n=1,2,\dots,N$; $m_{jk}(\xi_n) \cdot \bar{A}$ 为第 n 个子断层的地震矩强度; ξ_n 为第 n 个子断层中心的局部坐标位置。

1.2 宽频地震动合成

目前,结合确定性成分和随机成分的破裂建模思想得到广泛认可,相应的震源模型称为运动学混合震源模型,其中,确定性部分强调凹凸体的影响,而随机部分则强调随机散射效应的影响。这种更符合实际的混合震源模型对于强地震动预测等工作十分有利,尤其适用于对区域地壳内小尺度不均匀性缺乏充分了解的情形。参考Graves等^[27-28]的震源建模方法(即GP14.3),可通过以下步骤引入到本文所提出的混合方法中以实现宽频地震动合成。

1.2.1 混合滑动分布的确定

首先,在断层面上滑动分布中引入高波数随机扰动,将断层面上滑动量的空间分布经二维傅里叶变换至波数域,得到断层面上确定性的滑动波数谱 $D_{\text{slip}}(k_s, k_d)$:

$$D_{\text{slip}}(k_s, k_d) = \iint U_{\text{slip}}(x', y') e^{-ik_s x} e^{-ik_d y} dk_s dk_d \quad (4)$$

式中: k_s, k_d 分别为沿断层走向和倾向的波数, $U_{\text{slip}}(x', y')$ 为断层面上滑动量的空间分布; (x, y) 为断层面的全局坐标, (x', y') 为断层面上局部坐标; i 为虚数单位; e 为自然对数的底数; d 为微分符号。

其次,利用波数衰减满足Von Karman型自相关函数的波数谱,引入随机数 φ 表达震源中的随机成分 $A(k_s, k_d)$:

$$A(k_s, k_d) = \sqrt{\frac{1}{(1 + a_s^2 k_s^2 + a_d^2 k_d^2)^{(H+1)}}} e^{i\varphi} \quad (5)$$

式中: φ 为 $(-\pi, \pi)$ 区间上服从均匀分布的随机数; H 为Hurst指数; a_s 和 a_d 为与震级 M_w 相关的经验系数,具体定义如下:

$$\lg a_s = 0.5M_w - 1.7 \quad (6)$$

$$\lg a_d = 0.333M_w - 0.7 \quad (7)$$

最后,在波数域中结合确定性的低波数谱和随机高波数谱,并利用二维逆傅里叶变换至空间域中,则有:

$$U_{\text{slip}}^h(x', y') = 1/(2\pi)^2 \iint (D_{\text{slip}}(k_s, k_d) w + A(k_s, k_d) \times D_{\text{slip}}(0, 0)(1-w)) e^{ik_s x} e^{ik_d y} dk_s dk_d \quad (8)$$

式中: $U_{\text{slip}}^h(x', y')$ 为断层面上合成的宽频混合滑动量分布; w 为波数结合函数,用于选择确定性部分的低波数成分和随机部分的高波数成分,其表达式为:

$$w = \left(1 + \left(\frac{k_s^2}{k_{cs}^2} + \frac{k_d^2}{k_{cd}^2} \right)^p \right)^{-1} \quad (9)$$

式中: p 为控制结合的锐度; k_{cs} 和 k_{cd} 分别为沿断层走向和倾向的拐角波数,用于确定震源谱中低波数和高波数的结合界限。由此,断层面上的滑动量分布得以确定。

1.2.2 破裂时间分布的确定

因子源破裂时间、子源地震矩与局部滑动之间存在相关性,故引入随机扰动项 $\exp(\varepsilon\sigma_T)$ 以消除其与局部滑动的依赖性:

$$T_{ij}^F = T_{ij}^0 - 1.8 \times 10^{-9} M_0^{\frac{1}{3}} \frac{\lg(s_{ij}/s_A)}{\lg(s_M/s_A)} e^{\varepsilon\sigma_T} \quad (10)$$

式中: T_{ij}^F 为所需的破裂时间; T_{ij}^0 为子源的初始破裂时间估计; M_0 为标量地震矩; s_{ij} 为子源的局部滑动值; s_M 和 s_A 分别为整个断层面的最大滑动量和平均滑动量; ε 为标准正态分布随机数; σ_T 为对数标准差,本文取 $\sigma_T=0.2$ 。

此外,在确定断层面上各子源的初始破裂起始时刻 T_{ij}^0 时,应当考虑不同深度 z_s 处地壳层的破裂能力。地震学中,一般将地表以下5 km深度范围内的平均破裂速度设置为剪切波速的56%,深度大于8 km处的破裂速度设置为剪切波速的80%,5~8 km的区域设置为线性过渡区域,则有:

$$V_{\text{rup}} = \begin{cases} 0.56V_s, z_s \leq 5; \\ 0.08(z_s + 16)V_s/3, 5 < z_s < 8; \\ 0.8V_s, z_s \geq 8 \end{cases} \quad (11)$$

式中, V_{rup} 为断层破裂传播速度, V_s 为地壳介质的剪切波速, z_s 为子源的埋深。

2 断层-车站物理建模

2.1 地铁线路选取及地下车站模型

以天津市地铁地下车站为实例,进行断层-车站物理建模。天津地铁地下交通线网如图3所示。选取6个重要地下站点作为研究对象(图3中的红色圈)选取的站点或为重要铁路/航空交通枢纽,或为客流量极大的中心商务区,又或为高教资源富集区,均具有较好的代表性。



注：本线网图中所标注的车站为相对位置，仅供参考，请以实际地形为准；
“○”和“—”表示尚未开通的车站和线路。

图3 天津地铁地下交通线网(截至2022年)

Fig. 3 Underground transit network of Tianjin Metro (as of 2022)

基于有限元软件ABAQUS,以两层四跨地下车站作为基准模型^[29]建立局部场地土-地下车站相互作用模型。两层四跨地下车站基准模型的结构布置如图4所示。图4(a)中,地下车站由4个区域构成,主体为两层四跨矩形区域,上层用于人员流动,下层用于通车和候车,附体为单层双跨矩形区域和单层四跨矩形区域。用于理论建模的地下车站平面布置和主截面(截面3)如图4(b)所示,车站的埋深(区域I顶面至地表的距离)为4.8 m,截面1宽度为17 m,截面2宽度为26 m,截面3宽度为26 m。

建模时,地下车站的材料属性及其接触条件定义如下:车站材料采用强度等级为C30的混凝土,其密度 $\rho=2\,360\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=3\times10^{10}\text{ Pa}$,泊松比 $\nu=0.2$ 。车站结构采用三维实体单元(C3D8),其与场地的接触面采用绑定约束。为尽量提高计算精度,结构主体的网格尺寸为 $1\text{ m}\times1\text{ m}\times1\text{ m}$,柱的网格尺寸为 $0.2\text{ m}\times0.2\text{ m}\times0.2\text{ m}$ 。车站周围场地土体尺寸为 $500\text{ m}\times150\text{ m}\times50\text{ m}$,能够满足波传播精度要求(有效模拟频率可达10 Hz)。最终建立的考虑土-结构相互作用的地铁车站结构精细模型如图5所示。

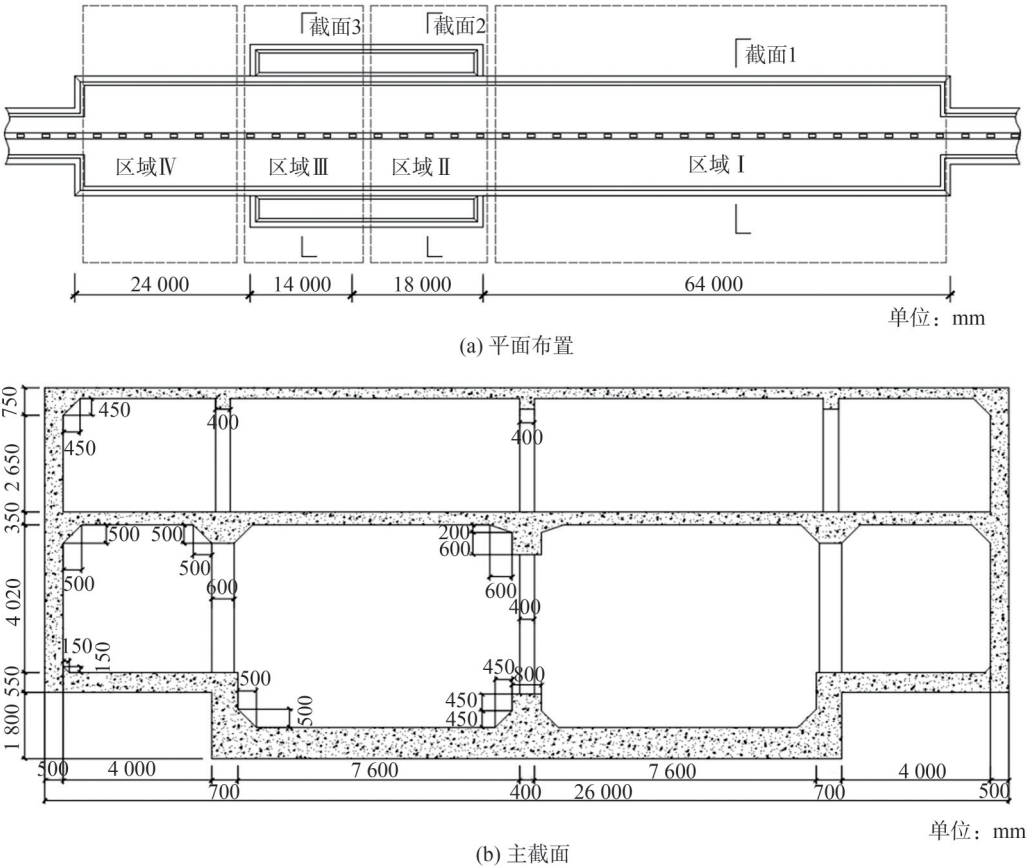


图 4 两层四跨地下车站基准模型的结构布置

Fig. 4 Structural layout of the benchmark model for a two-story, four-span subway station

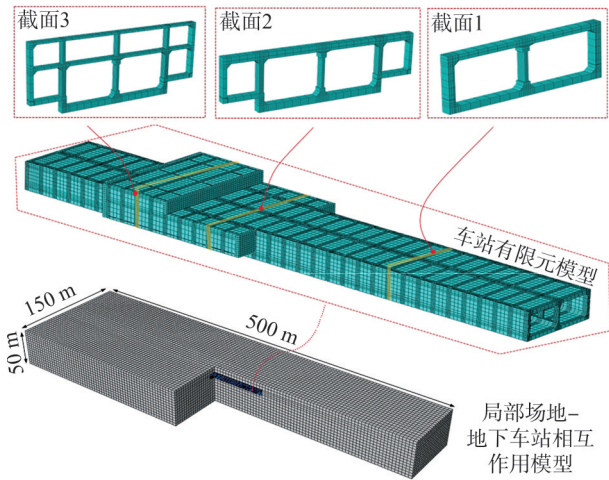


图 5 地铁车站结构精细建模

Fig. 5 Detailed structural modeling for a subway station

2.2 天津南断裂设定 M_w 6.1 地震波形预测

2.2.1 目标断层震源模型的建立

陈宇坤等^[30]开展了天津地区断层小区的细化工作,主要利用断层位置、活动性和分段特征,将天津地区划分为天津南断裂、海河断裂、沧东断裂等 19 个断层小区。根据该文献资料,拟合得到天津地区历史最大震级和频度的经验关系如图 6 所示。由此可计算出天津南断裂未来最大的潜在地震矩震级 M_w 为 6.1 级。

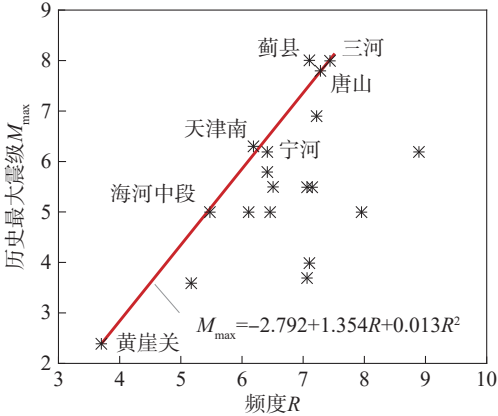


图 6 天津地区历史最大震级-频度经验关系

Fig. 6 Empirical relationship between historical maximum magnitude and frequency in Tianjin region

选定天津南断裂作为目标断层来建立有限断层震源模型。与有资料记载的历史地震和记录良好的近期地震不同,未来地震震源模型参数的设定依赖于发震断裂的构造活动性以及参数间的经验关系。本文依据陈宇坤等^[30]对天津地区地震危险性评价结果和姜伟等^[31]统计的震源参数定标律,设定了震源参数,具体包括:1)全局震源参数;2)局部震源参数;3)基于全局和局部参数的震源时空破裂过程。模型中,断层性质为右旋走滑为主、正断层为辅,断层前缘接近天津市区外环线,震源时间

函数采用无谱洞的 Brune 函数^[22]。天津南断裂设定 M_w 6.1 地震全局、局部震源参数分别如表 1 和 2 所示。

表 1 天津南断裂设定 M_w 6.1 地震全局震源参数
Tab. 1 Global source parameters for a M_w 6.1 scenario earthquake on the Tianjin South Fault

震源参数	参数值	震源参数	参数值
断层长度/km	14	震中位置	(39.07° N, 117.01° E)
断层宽度/km	9	断层走向/(°)	30
震级 M_w	6.1	断层倾角/(°)	75
断层上界埋深/km	5.0	滑动角/(°)	210
破裂传播速度/(km·s ⁻¹)	2.65	平均滑动量/cm	40

表 2 天津南断裂设定 M_w 6.1 地震局部震源参数
Tab. 2 Local source parameters for a M_w 6.1 scenario earthquake on the Tianjin South Fault

局部参数	定标律	参数值
面积 S_m /km ²	$\lg S_m = \lg S - 0.80$	20
平均滑动量 $\bar{D}_m$ /cm	$\lg \bar{D}_m = \lg \bar{D} + 0.38$	96
长度 L_m /km	$\lg L_m = \lg L - 0.48$	4.6
宽度 W_m /km	$W_m = S_m / L_m$	4.3
沿走向中心 X_m /km	$\lg X_m = \lg L - 0.32$	6.7
沿倾向中心 Y_m /km	$\lg Y_m = \lg W - 0.35$	4.0
沿走向 X_s /km	$\lg X_s = \lg L - 0.33$	6.5
沿破裂面向下 Y_s /km	$\lg Y_s = \lg W - 0.29$	4.6

在全球和局部震源参数的基础上,建立低波数确定性震源模型,进而采用第 1.2 节中运动学混合震源建模方法,针对破裂过程引入高波数随机成分,以确保合成宽频地震动的带宽有效性。通过 Python 编程,获得混合震源时空破裂模型,天津南断裂设定 M_w 6.1 地震的时空破裂过程如图 7 所示,星号表示破裂起始点。

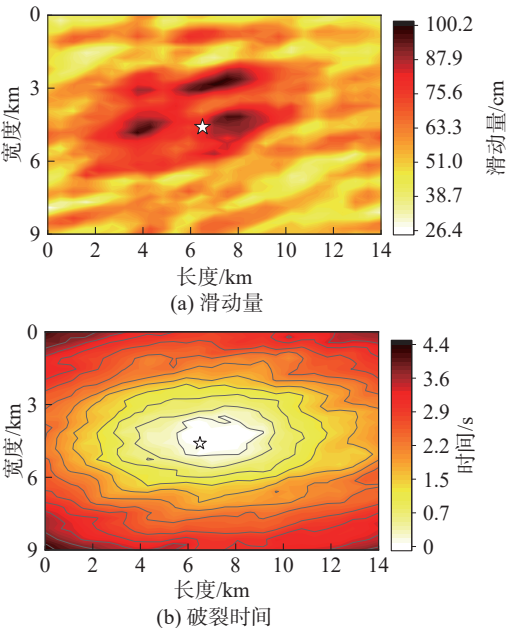


图 7 天津南断裂设定 M_w 6.1 地震的时空破裂过程
Fig. 7 Spatiotemporal rupture of a M_w 6.1 scenario earthquake on the Tianjin South Fault

2.2.2 区域地下速度结构的构造

天津市地震局在天津市布设了若干条浅层地震勘探线,建立了天津市钻孔数据库。为使结果更为贴近实际,本文利用天津南断裂附近西青区某地的钻孔数据,结合 Crust1.0 全球地壳模型,构造了适用于天津地区地铁车站响应分析的精细地下速度结构模型,具体参数见表 3。在此背景模型下,FK 计算时设时间步长为 0.05,最大积分波数为 30,最小积分间隔为 0.1,以确保宽频自由场求解的准确性。

表 3 天津南断裂附近区域地下速度结构
Tab. 3 Underground velocity structure of the region near the Tianjin South Fault

层序	介质描述	层厚/m	深度/m	密度/(kg·m ⁻³)	波速/(m·s ⁻¹)	品质因子
1	素填土	7.3	7.3	1 950	112	35
2	粉质黏土	8.2	15.5	1 970	154	35
3	粉土	3.9	19.4	2 020	260	35
4	粉质黏土	11.1	30.5	1 990	235	35
5	粉砂	9.2	39.7	2 080	375	35
6	粉质黏土	12.3	52.0	1 980	358	35
7	粉土	34.3	86.3	2 040	468	35
8	粉质黏土	33.7	120.0	2 110	530	35
9		680.0	800.0	2 000	1 000	80
10		3 200.0	4 000.0	2 350	1 800	200
11	基岩	8 000.0	12 000.0	2 700	3 450	500
12		7 000.0	19 000.0	2 800	3 500	800
13		13 000.0	32 000.0	2 880	3 650	1 000
14		∞	∞	2 960	3 700	1 000

2.2.3 场地地震动幅值及波形特征

所研究的 6 个地铁车站及相应的经纬度坐标为:天津南站(39.057°N, 117.061°E)、营口道站(39.119°N, 117.198°E)、天津西站(39.158°N, 117.163°E)、天津站(39.135°N, 117.211°E)、海河教育园区站(38.988°N, 117.332°E)和滨海机场站(39.131°N, 117.359°E)。进而,可得各车站相对于震中的计算点坐标位置,模型坐标可由经纬度和投影带号换算得到。采用 FK-SEM 混合方法计算宽频地震动,其中地铁车站附近的地形由 SEM 建模,余下数十千米断层破裂产生的地震波在地壳层中的传播通过 FK 半解析求得。按每个波长内至少包含 5 个高斯-洛巴托-勒让德(Gauss-Lobatto-Legendre)积分点的精度要求进行谱单元网格剖分,可实现 0~10 Hz 频率范围内的地震动模拟。

设定地震下各车站地表的加速度波形及其反应谱如图 8 所示。图 8 给出了各个车站地表的三分量加速度波形及相应的反应谱(阻尼比 5%)。由图 8 可知:

1)天津南断裂设定 M_w 6.1 地震发生时,对天津市西南片区的部分区域可能产生破坏性影响。局部地区的最

大加速度峰值达到 2.32 m/s^2 ,由于天津市抗震设防烈度为7度、设计基本地震加速度值为 $0.15g$,合成地震动水平或将超过现行抗震设防标准中规定的一般建设工程的设防水准,接近年超越概率为 0.02% 的大震设防水准。在这种地震情景下,针对天津地区的工程结构开展抗震分析具有重要意义。

2)合成地震动在三方向的加速度波形及反应谱存在较大差异,且各测点的地面运动特征显著不同。总体上,水平向地震动大于竖向地震动,例如,天津南站和天津西站的水平峰值地面加速度(PGA)分别为竖向PGA的1.87倍和1.99倍,其余测点的水平PGA亦高于竖向

值。从加速度时程及其反应谱可见,各测点的地震动波形、持时与频率成分均有显著差异,这与“震源-路径-场地”整个反应链有关。因此,在工程结构抗震分析中采用多维多点地震动输入十分必要。

以上分析论证了天津南断裂震源破裂建模和地下速度结构构造方案的可靠性,并开展设定地震下天津地区实际地铁车站结构地震响应分析的重要性。在此基础上,以合成的宽频地震波作为土层-车站系统的多维多点地震动输入,结合建立的局部场地-地下车站相互作用有限元模型,进一步完成从场地至结构的地震响应分析。

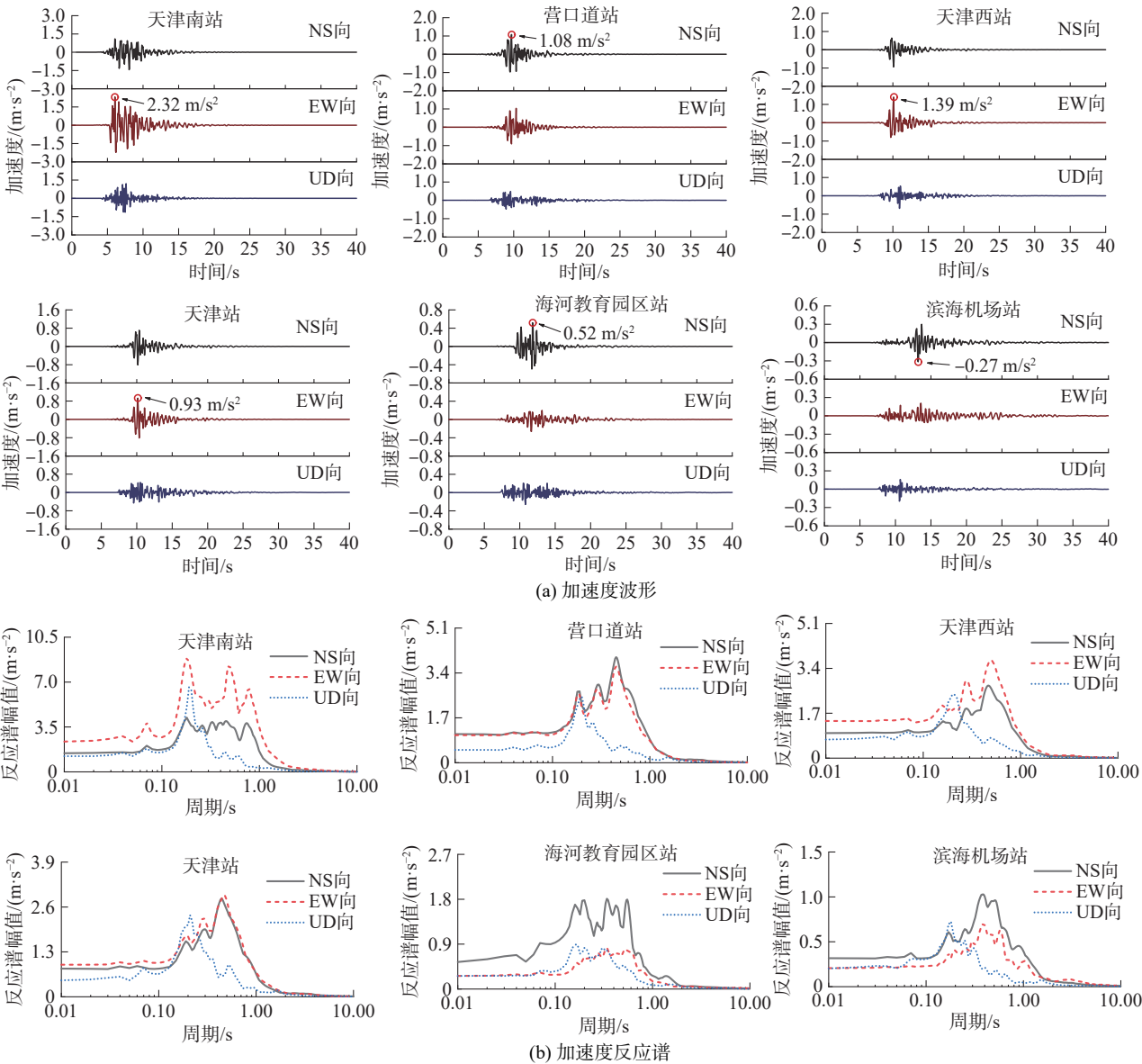


图8 设定地震下各车站地表的加速度波形及其反应谱

Fig. 8 Ground acceleration waveforms and corresponding response spectra at each station during the scenario earthquake

3 地铁车站结构地震响应

近断层地震动下不同车站3种截面水平向的位移

和变形云图如图9所示。从纵向和横向角度进行比较,可以得出:

1)纵向上,天津南断裂设定 $M_w6.1$ 地震发生时,

天津地区不同地铁车站的变形模式和变形量存在显著差异。天津南站的结构变形最为明显,破坏水平高出其他车站一个量级,同时由于距离震中较近,变形量达到最大的时刻也更为提前。营口道站、天津西站和天津站的结构变形相当,变形模式接近且有别于天津南站,同时变形量最大时刻较天津南站

延后了 2.9~3.6 s。海河教育园区站和滨海机场站的结构变形最小,由于震中距较大使得整体破坏水平较低,柱和墙体的剪切变形特征不明显,且变形量达到最大的时刻较天津南站延后了 5.0~5.3 s。以上分析体现了震源和传播路径对结构的影响。

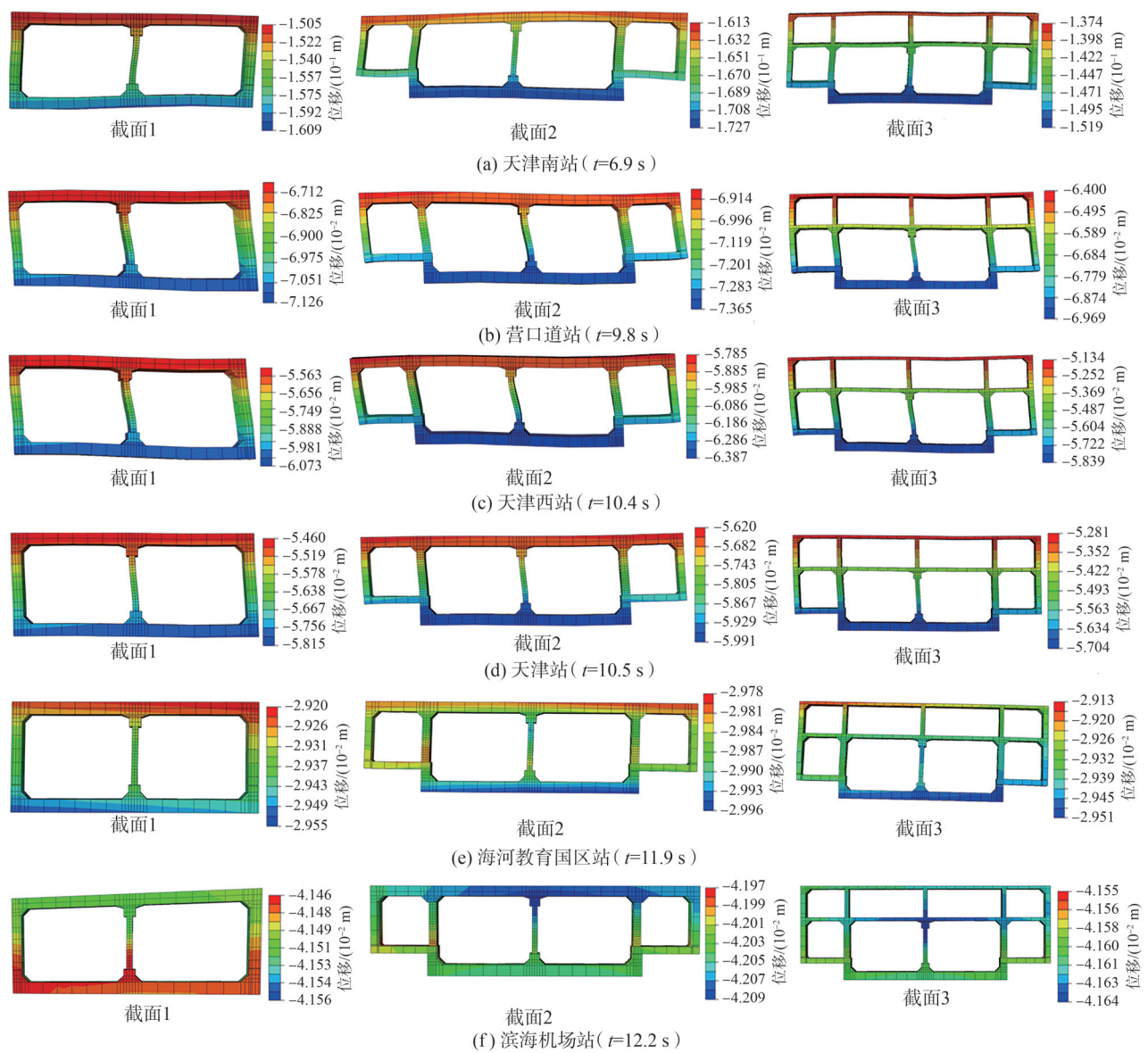


图9 近断层地震动下不同车站的变形云图

Fig. 9 Deformation contours of different stations under near-fault ground motion

2)横向上,天津南断裂设定 M_w 6.1地震发生时,天津地区各地铁车站的变形模式和变形量存在一定差异。近断层地震动作用下,6个车站不同断面的变形特征均表现为:单层多跨连接结构(截面2)的破坏水平略高于其他结构层(截面1和3),底层柱的变形大于上层柱,且柱的变形大于侧墙变形(近断层区域更为明显),这与类似车站的实际震害(Iida等^[29])特征相符。以上分析体现了车站结构自身特性的影响。

近断层地震动下不同车站3种截面中柱的最大层间位移角(附中柱水平向变形)如图10所示。由图10可以看出,天津南断裂设定 M_w 6.1地震发生时,天津地区不同地铁车站的结构层间位移存在较大差异。天津南站的层间位移角远大于其他车站,其3个截面的位移幅值分别达到2.30‰、3.09‰和3.22‰。

随着车站逐渐远离震源区域,最大层间位移角急剧减小,例如:对于截面1,营口道站、天津西站、天津站、海

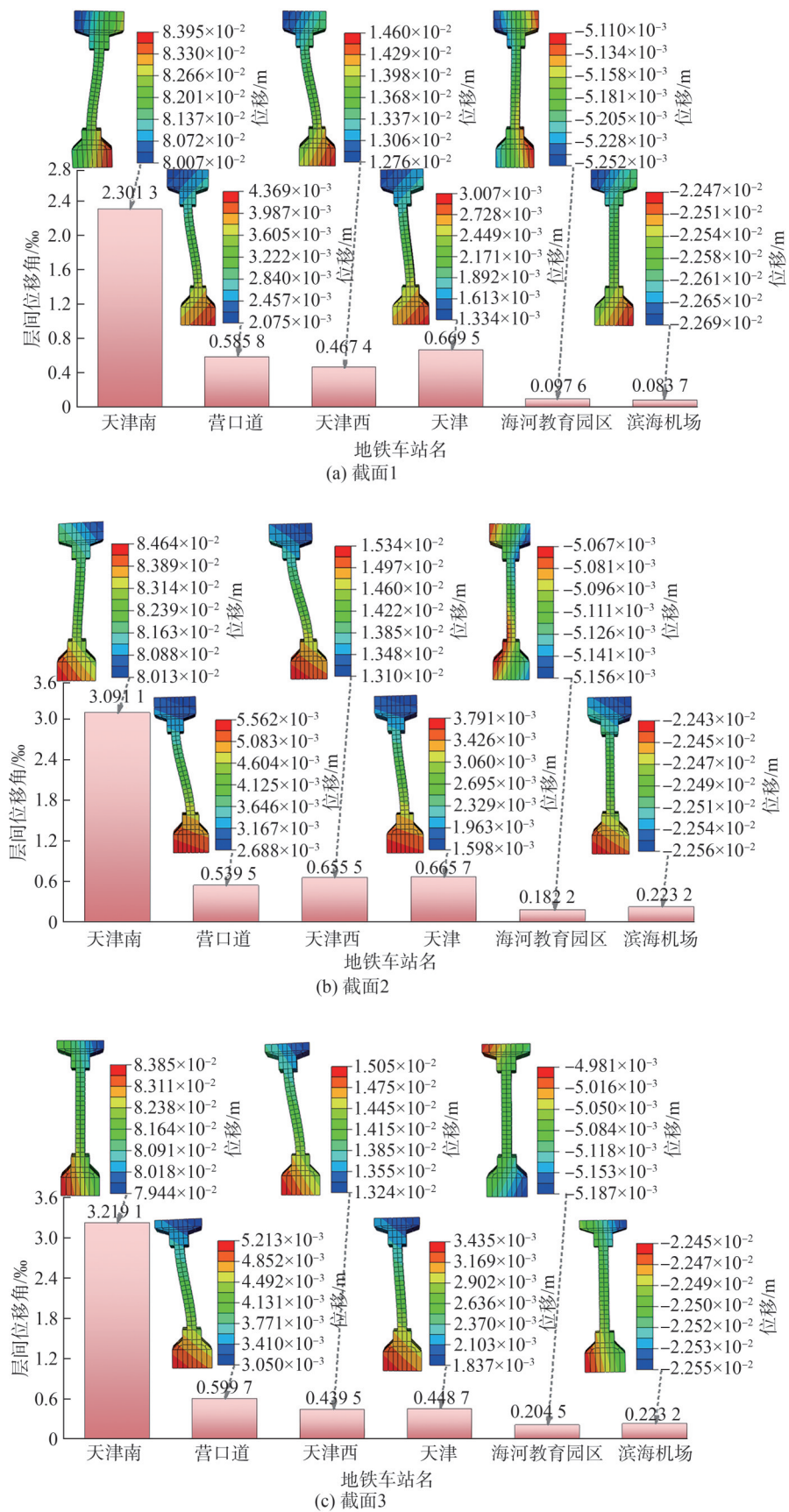


图 10 近断层地震动下不同车站的最大层间位移角

Fig. 10 Maximum inter-story drift angles of different stations under near-fault ground motion

河教育园区站和滨海机场站的位移幅值相较于天津南站依次减小了 74.5%、79.6%、70.9%、95.7% 和 96.3%; 对于截面 2, 位移幅值依次减小了 82.5%、78.7%、78.4%、94.1% 和 92.8%; 对于截面 3, 位移幅值依次减小了 81.3%、86.3%、86.1%、93.6% 和 93.1%。分析可知, 相比近场中的天津南站, 距断裂较远的海河教育园区站和滨海机场站的层间位移角仅为 5% 左右。

根据《地下结构抗震设计标准》(GB/T 51336—2018)^[32], 对本文研究的单层/双层车站形式进行弹性变形验算时, 层间位移角限值为 1/550, 进行塑性变形

验算时, 层间位移角限值为 1/250。由此可知: 在本文的设定地震方案下, 天津南站的变形接近塑性变形限值, 可能发生塑性变形; 而其他车站的变形远小于弹性变形限值, 整体处于弹性变形阶段。此外, 不同车站中柱 X 向的变形云图有明显差异, 变形模式的规律与图 9 类似, 而变形量的规律不仅和震中距有关, 可能还受不同车站所在区域局部地形条件的影响。

近断层地震动下不同车站 3 个截面侧墙在水平双向 (X 向与 Y 向) 的相对位移沿侧墙高度 (以深度值表示) 的变化如图 11 所示。由图 11 可知:

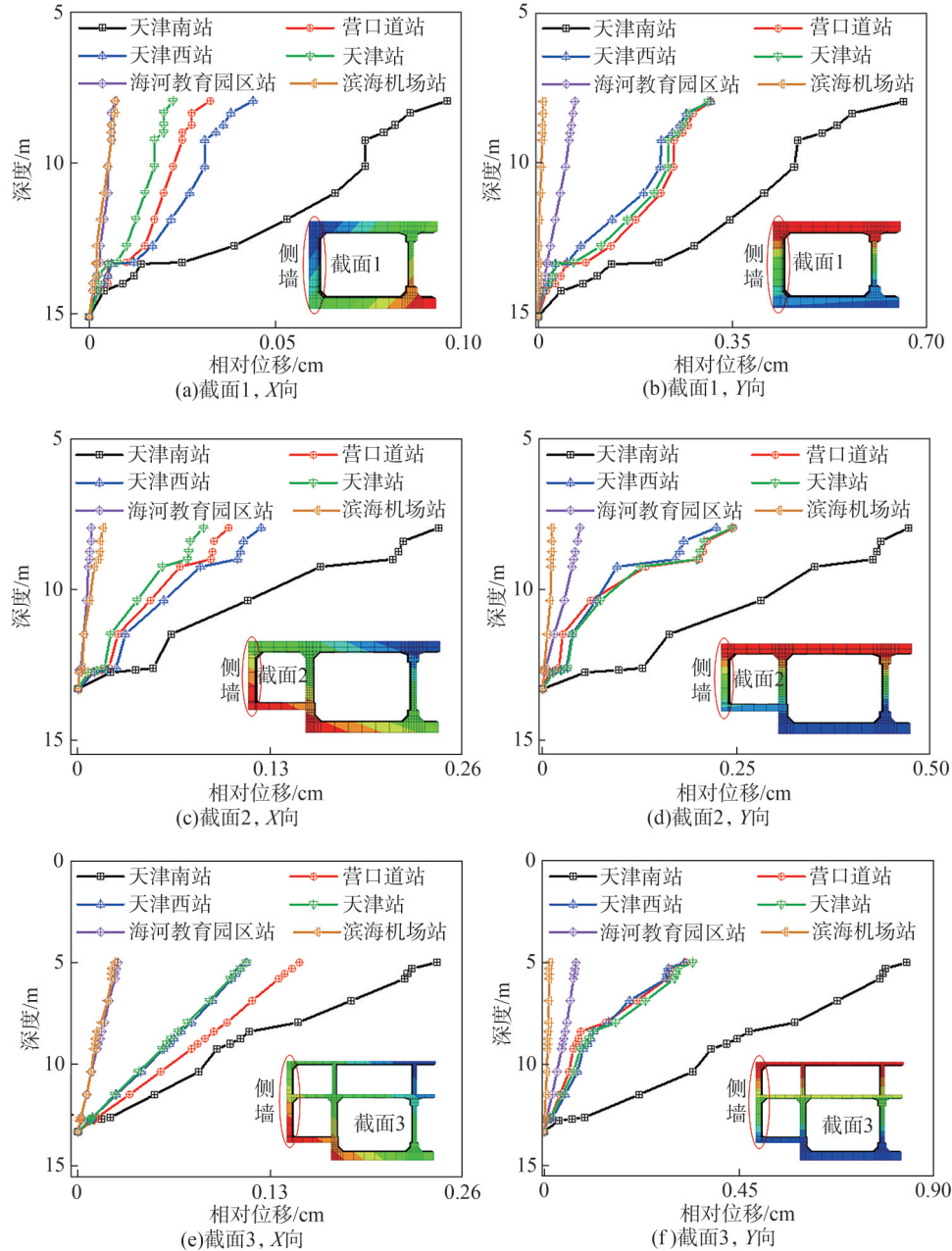


图 11 近断层地震动下不同车站的侧墙相对位移

Fig. 11 Lateral wall relative displacements of different stations under near-fault ground motion

1) 同一结构断面中, 侧墙 X 向和 Y 向相对位移沿深度的变化规律相似, 但峰值存在较大差异。侧墙相

对位移沿高度的变化呈现非线性特征, 观察发现, 车站侧墙转角处的相对位移变化均较小, 而侧墙墙体相

对位移变化剧烈。如截面1的 X 向中,曲线两端的幅值差异明显小于曲线中段且存在“拐点”现象,这一现象主要由车站自身结构特性决定的。其次,侧墙 Y 向的相对位移显著大于侧墙 X 向,以天津南站为例,截面1中 X 向和 Y 向的峰值分别为0.096和0.658 cm,截面2中 X 向和 Y 向的峰值分别为0.244和0.472 cm,截面3中 X 向和 Y 向的峰值分别为0.243和0.838 cm。3个截面的 Y 向峰值分别为 X 向的6.9、1.9和3.4倍,这种差异主要是由近断层三方向地震动输入和场地-结构相互作用共同决定的。

2)不同结构断面中,侧墙相对位移曲线变化趋势存在一定差异,但各截面下车站的破坏严重度分级相当。天津南断裂设定 M_w 6.1地震发生时,无论何种结构断面,不同车站的破坏的严重程度大致可划级为:天津南站的侧墙相对位移曲线幅值最大,具有较高潜在风险;营口道站、天津西站和天津站的侧墙相对位移曲线的走势相似、幅值相当且明显小于天津南站,具有中等破坏风险;海河教育园区站和滨海机场站的侧墙相对位移曲线的幅值及其变化很小,具有较低潜在风险。

4 结 论

本文采用确定性物理模拟方法构建了震源-路径-场地耦合的强地震动场,进而将模拟地震动作为输入以评估近断层场地中地铁车站结构的抗震性能,实现断层-车站全链条情景构建。基于地震波传播模拟的FK-SE-FE混合方法和宽频地震动合成的运动学混合震源模型,研究了天津南隐伏断裂背景下天津市地铁地下车站的动力响应及破坏风险。主要结论如下:

1)发展的断层-车站全过程响应模拟方法遵循三步域缩减思想和强耦合分析框架,可有效考虑震源破裂模式、区域地壳介质传播、局部场地效应和土-结构相互作用等关键物理过程,为基于设定地震的近断层地铁车站结构宽频地震响应分析提供了一种高效、精确且实用的数值方法。

2)天津南断裂设定 M_w 6.1地震发生时,对天津市西南片区的部分区域可能产生破坏性影响,局部地区最大的加速度峰值达到 2.32 m/s^2 。此外,合成地震动的三方向加速度波形及反应谱差异较大,且各测点的地面运动特征显著不同。因此,工程结构抗震分析中采用多维多点地震动输入十分必要。

3)从变形云图、最大层间位移角和侧墙相对位移等方面比较了不同车站的动力响应,发现其抗震性能的差异由近断层三方向地震动输入、场地-结构相互

作用和车站结构自身特性综合体现。设定 M_w 6.1地震下,结构破坏风险严重度由高到低依次为天津南站>营口道站、天津西站和天津站>海河教育园区站和滨海机场站。研究可为天津地区地下交通工程的抗震设防提供参考。

【致谢】感谢天津市地震局提供的天津地区钻孔资料。

参考文献:

- [1] Li Haiyang, Hu Chenxu, Zhu Mengying, et al. Study on the coupled and coordinated development of urban resilience and urbanization level in the Yellow River Basin[J]. Environment, Development and Sustainability, 2025, 27(8): 19675–19705.
- [2] Cui Jianqiang, Broere W, Lin Dong. Underground space utilisation for urban renewal[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103726.
- [3] Zhong Zilan, Wang Zhen, Zhao Mi, et al. Structural damage assessment of mountain tunnels in fault fracture zone subjected to multiple strike-slip fault movement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103527.
- [4] Yan Gaoming, Zhao Boming. Analytical solution for longitudinal seismic response of fault-crossing tunnels[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(2): 26–38. [闫高明, 赵伯明. 穿越断层隧道纵向地震响应规律解析解[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(2): 26–38.]
- [5] An Xuehui, Shawky A A, Maekawa K. The collapse mechanism of a subway station during the Great Hanshin earthquake[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(3): 241–257.
- [6] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(4): 247–293.
- [7] 巴振宁, 梁建文, 吴孟桃. 横观各向同性半空间波动理论及其在土木工程中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [8] Liu Jingbo, Li Bin. Issues on the seismic analysis and design of subway structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 106–110. [刘晶波, 李彬. 地铁地下结构抗震分析及设计中的几个关键问题[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 106–110.]
- [9] Liang Jianwen, Zhu Jun. A FE-IBE method for linearized nonlinear soil-tunnel interaction in water-saturated, poroelastic half-space: I. Methodology and numerical examples[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 120: 454–467.
- [10] Esmaeili M, Vahdani S, Noorzad A. Dynamic response of lined circular tunnel to plane harmonic waves[J]. Tun-

- nelling and Underground Space Technology,2006,21(5): 511–519.
- [11] Liang Jianwen, Wu Mengtao, Ba Zhenning, et al. A hybrid method for modeling broadband seismic wave propagation in 3D localized regions to incident P, SV, and SH waves[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2021,13(10):2150119.
- [12] Qiu Dapeng, Chen Jianyun, Xu Qiang. 3-D numerical analysis on seismic responses of the underground large scale frame structure under near-fault ground motions[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019,91:103020.
- [13] Jiang Jiawei, El Naggar H M, Xu Chengshun, et al. Effect of ground motion characteristics on seismic fragility of subway station[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021,143:106618.
- [14] Cui Zhen, Sheng Qian, Leng Xianlun, et al. Effects of near-fault ground motion on seismic response of underground caverns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(11): 3213–3220. [崔臻, 盛谦, 冷先伦, 等. 近断层地震动对大型地下洞室群地震响应的影响研究[J]. 岩土力学, 2013,34(11): 3213–3220.]
- [15] Zhao Wusheng, Chen Weizhong. Effect of near-fault ground motions with long-period pulses on the tunnel[J]. Journal of Vibroengineering, 2015,17(2):841–858.
- [16] He Wei, Chen Jianyun, Wen Ruizhi. Study on the influence of the vertical seismic wave on the earthquake response of tunnel in the soft soil[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010,42(5):271–276. [何伟, 陈健云, 温瑞智. 竖向地震动对软土地铁隧道地震响应影响分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010,42(5): 271–276.]
- [17] Zhang Hai, Wang Chengxi, Wang Dai, et al. Study on seismic fragility of shallow buried utility tunnel under near-fault ground motion[J]. Engineering Mechanics, 2024,41(2):213–221. [张海, 王程西, 王岱, 等. 近断层地震动作用下浅埋综合管廊地震易损性研究[J]. 工程力学, 2024,41(2): 213–221.]
- [18] Ba Zhenning, Wu Mengtao, Liang Jianwen, et al. A two-step approach combining FK with SE for simulating ground motion due to point dislocation sources[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022,157:107224.
- [19] Wu Mengtao, Ba Zhenning, Liang Jianwen. A procedure for 3D simulation of seismic wave propagation considering source-path-site effects: Theory, verification and application[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2022, 51(12):2925–2955.
- [20] Miao Yu, Zhong Yi, Ruan Bin, et al. Seismic response of a subway station in soft soil considering the structure-soil-structure interaction[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2020,106:103629.
- [21] Jia Junfeng, Du Xiuli, Han Qiang. A state-of-the-art review of near-fault earthquake ground motion characteristics and effects on engineering structures[J]. Journal of Building Structures, 2015,36(1):1–12. [贾俊峰, 杜修力, 韩强. 近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015,36(1):1–12.]
- [22] Wu Mengtao, Wang Bin, Ba Zhenning, et al. Seismic simulation of the overall physical model of source-basin-structure: FK–SE–FE method[J]. Journal of Vibration Engineering, 2026,39(1):167–179. [吴孟桃, 王斌, 巴振宁, 等. 震源–盆地–结构整体物理模型地震模拟: FK–SE–FE 方法[J]. 振动工程学报, 2026,39(1),167–179.]
- [23] Aki K, Richards P G. Quantitative Seismology: 2nd ed. [M]. California: University Science Books, 2002.
- [24] Liang Jianwen, Wu Mengtao, Ba Zhenning. Simulation of broadband seismic wave propagation in a crustal half-space in frequency-wavenumber domain generated by shear dislocation sources[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022,41(3):543–558. [梁建文, 吴孟桃, 巴振宁. 频率波数域内地壳层半空间剪切位错源宽频地震波传播模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3):543–558.]
- [25] Liang Jianwen, Wu Mengtao, Ba Zhenning. Three-dimensional dynamic Green's functions for transversely isotropic saturated half-space subjected to buried loads[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2019,108:301–320.
- [26] Ba Zhenning, Wu Mengtao, Liang Jianwen. 3D dynamic responses of a multi-layered transversely isotropic saturated half-space under concentrated forces and pore pressure[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020,80:859–878.
- [27] Graves R, Pitarka A. Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010,100(5A):2095–2123.
- [28] Graves R, Pitarka A. Refinements to the Graves and pitarka (2010) broadband ground-motion simulation method[J]. Seismological Research Letters, 2015,86(1):75–80.
- [29] Iida H, Hiroto T, Yoshida N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. Soils and Foundations, 1996,36:283–300.
- [30] 陈宇坤, 赵国敏, 闫成国, 等. 天津市活动断层探测与地震危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [31] Jiang Wei, Tao Xiaxin, Tao Zhengru, et al. Scaling laws of local parameters of finite fault source model[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017,37(6): 23–30. [姜伟, 陶夏新, 陶正如, 等. 有限断层震源模型局部

参数定标律[J].地震工程与工程振动,2017,37(6):23–30.]
[32] 清华大学,北京城建设计发展集团股份有限公司.地下

结构抗震设计标准:GB/T 51336—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.

Broadband Seismic Response Analysis of Near-fault Subway Station Structures Under Scenario Earthquakes

WU Mengtao¹, WANG Bin¹, BA Zhenning^{2*}, DAI Kaoshan¹, LIANG Jianwen²

(1.Department of Civil Engineering, Sichuan University, Chengdu 610207, China;

2.Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract:

Objective This study accurately assesses the seismic safety of near-fault subway station structures by developing an advanced methodology and procedure. Currently, this assessment faces two major challenges, namely the scarcity of near-fault seismic records and the lack of practical modeling methods. This study proposes a deterministic physics-based simulation approach to construct strong ground motion fields that couple source, path, and site effects, and then uses the simulated motions as inputs to assess the seismic performance of critical station structures located at near-fault sites.

Methods Firstly, this study introduced a comprehensive fault-to-station response simulation approach that comprised two main components: the FK–SE–FE hybrid method for simulating seismic wave propagation and the GP14.3 source model for synthesizing broadband ground motions. Specifically, the first component employed the FK–SEM hybrid method to simulate wave propagation from the source to the site, while the SEM–FEM hybrid method was utilized to simulate wave propagation from the site to the structure. The second component integrated high-frequency stochastic perturbations into the low-wavenumber deterministic asperity source model to ensure the bandwidth effectiveness of the synthesized ground motion, constructing the GP14.3 kinematic hybrid source model. This integrated simulation approach enabled a comprehensive analysis from fault rupture to structural response and effectively considered several key physical processes within the seismic scenario chain, including: 1) fault rupture mechanics; 2) regional crustal wave propagation; 3) local site effects; and 4) soil-structure interaction. Secondly, the underground stations of the Tianjin Metro were taken as an example, and six important stations were selected as research subjects based on the existing rail transit network. A refined finite element model of the subway station structure was established while explicitly considering soil-structure interaction. In addition, against the backdrop of the Tianjin hidden fault, and based on active fault detection, seismic hazard assessment, and geotechnical exploration drilling data for the target area, a kinematic hybrid source model of the target fault and the regional underground velocity structure was constructed. Finally, the synthesized broadband seismic waves were employed as input motions to investigate the dynamic responses and damage risks of various subway station structures under the prescribed earthquake scenarios.

Results and Discussions The synthesized ground motions revealed substantial variations in acceleration waveforms and response spectra across the selected stations. Peak ground acceleration (PGA) values at specific locations reached up to 2.32 m/s^2 , which significantly exceeded the standard design basis seismic acceleration value of $0.15g$ for general construction projects in Tianjin. This finding highlighted the necessity for site-specific seismic assessments. Horizontal seismic motions were generally more pronounced than vertical motions, with horizontal PGAs reaching values up to twice those of the vertical components in some cases, indicating the importance of incorporating multi-directional seismic inputs in structural dynamic analyses. The structural deformation patterns exhibited considerable variability among the stations. Tianjin South station experienced the most severe deformation and the highest damage risk due to its proximity to the fault trace, with maximum interstory drift ratios approaching the plastic deformation threshold, which indicated a high potential for significant structural damage. In contrast, stations such as Yingkou Road, Tianjin West, and Tianjin stations exhibited moderate deformation levels, whereas Haihe Education Park and Binhai Airport stations experienced minimal deformation, indicating relatively lower risk profiles. Lateral wall relative displacements demonstrated nonlinear variations along the structural height. Displacements in the y -direction were larger than those in the x -direction, reflecting the complex interactions between multi-directional seismic inputs and the soil-structure system. The severity of potential structural damage varied among the stations, with Tianjin South station exhibiting the highest displacement values, followed by moderate risk levels at Yingkou Road, Tianjin West, and Tianjin stations, and minimal risk levels at Haihe Education Park and Binhai Airport stations. These results demonstrated the effectiveness of the proposed FK–SE–FE hybrid method combined with the kinematic hybrid source model in capturing the spatial variability of seismic motions and the complex interactions within the soil-structure system. The method provided a precise and practical tool for the seismic risk assessment of near-fault subway stations, empha-

sized varying vulnerability levels, and highlighted the necessity for site-specific seismic design considerations.

Conclusions This study presents an advanced methodology and systematic procedure for evaluating the seismic response of near-fault subway stations by employing the FK–SE–FE hybrid method in conjunction with the GP14.3 kinematic hybrid source model. The results demonstrate the effectiveness of this integrated approach in accurately capturing complex interactions and the spatial variability of seismic motions. The analysis indicates that stations located in proximity to the fault line, such as Tianjin South, are subjected to significantly higher risks of severe deformation and structural damage, highlighting the necessity for enhanced seismic design measures in these locations. In contrast, stations situated farther from the fault, including Haihe Education Park and Binhai Airport, exhibit comparatively lower seismic risk levels. The proposed procedure provides meaningful insights for engineers and researchers seeking to enhance the resilience and safety of subway infrastructure in earthquake-prone regions. Overall, the results highlight the critical importance of site-specific seismic design considerations and the implementation of advanced simulation techniques for mitigating seismic hazards.

Key words: scenario earthquake; seismic wave propagation; hybrid source model; subway station; full-process response

(编辑 周 璇)

引用格式: Wu Mengtao, Wang Bin, Ba Zhenning, et al. Broadband seismic response analysis of near-fault subway station structures under scenario earthquakes[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(2): 253–266. [吴孟桃, 王斌, 巴振宁, 等. 基于设定地震的近断层地铁车站结构宽频地震响应分析[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(2): 253–266.]