



水平和竖向地震动联合作用下地铁隧道地震易损性分析

王晓磊*, 孙恒, 赵紫旭, 何维, 韩子安, 阎卫东

沈阳建筑大学土木工程学院, 沈阳 110168

* E-mail: wangxl@sju.edu.cn

收稿日期: 2025-01-13; 接受日期: 2025-08-25; 网络版发表日期: 2026-01-19

国家自然科学基金项目(批准号: 51908379)、辽宁省重点研发项目(编号: 2024JH2/102500078)和中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(编号: 2023D19)资助

摘要 同时考虑水平和竖向地震动及不确定性影响的地铁隧道抗震安全性研究较为欠缺, 为了精细化考虑水平和竖向地震动联合作用下地铁隧道抗震安全能力, 本文开发了基于多目标优化算法的水平和竖向地震动联合选取方法, 面向隧道结构水平和竖向规范谱, 联合选取能够同时匹配水平和竖向规范谱的地震动记录, 基于选取得到的地震动记录, 采用相关性、有效性、实用性和效益性准则, 开展水平和竖向地震动作用下隧道结构最优强度参数分析, 基于最优强度参数, 分析水平和竖向地震动作用下隧道结构地震易损性, 最后评估水平和竖向地震动作用下地铁隧道抗震安全能力. 分析结果表明: 竖向地震动对最优强度参数评估影响较小, 最优地震动强度参数为速度复合强度 I_V ; 水平-竖向地震动联合作用下隧道结构安全裕度显著小于水平向地震作用下隧道结构安全裕度, 竖向地震动对地铁隧道结构安全性造成很大影响. 该研究结果将为多维地震动作用下地铁隧道抗震设计与评估提供参考.

关键词 水平和竖向地震动, 地震动选取, 地铁隧道, 最优强度参数, 易损性分析

1 引言

近年来, 隧道结构在地震作用下发生破坏的实例屡见不鲜, 1995年阪神地震、1999年帕尼塔地震、1999年台湾集集地震、1976年唐山地震和2008年汶川地震都对隧道结构安全性产生较大影响. 一直以来, 研究人员认为水平向地震作用是造成隧道发生破坏的主要原因, 开展了水平向地震动作用下隧道结构抗震研究:

2022年, 沈万虎等^[1]开展了水平强震作用下地铁隧道结构抗震安全性分析; 2023年, 徐安全等人^[2]研究了水平地震动作用下软硬土层变化面隧道结构动力响应. 随着抗震设防标准提高以及高烈度地震灾害的出现, 一些研究人员开始深入研究竖向地震活动对地下结构破坏作用: 2020年, 王杰等人^[3]开展了水平和竖向地震动联合作用下双线隧道结构确定性抗震分析; 2024年, 杨楚凡等人^[4]建立了土-隧道结构相互作用模型, 研究

引用格式: 王晓磊, 孙恒, 赵紫旭, 等. 水平和竖向地震动联合作用下地铁隧道地震易损性分析. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 419–436
Wang X L, Sun H, Zhao Z X, et al. Seismic fragility analysis of subway tunnel under horizontal and vertical ground motions (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 419–436, doi: 10.1360/SST-2025-0010

了隧道模型在水平和竖向地震动联合作用下响应规律.

为考虑地震发生的不确定性, 有研究人员深入探讨了隧道结构在水平方向地震动作用时的抗震性能: 2020年, 在水平地震动作用下, Huang等人^[5,6]建立了软土隧道结构易损性曲线, 获得各个地震强度下隧道发生不同损伤概率, 为类似结构抗震安全评估提供参考和依据; 2022年, 禹海涛等人^[7]建立了沉管隧道纵向地震易损性分析方法及评估指标, 为沉管隧道纵向抗震性能评估及地震风险分析提供科学依据; 2024年, Liu等人^[8]建立了水平地震作用下饱和沙土中圆形隧道地震易损性曲线, 考虑了液化效应对结构响应和易损性的影响. 目前, 研究人员主要针对水平地震动作用下地铁隧道结构进行抗震安全评估, 水平和竖向地震动联合作用下隧道结构抗震安全评估研究还相对匮乏.

地震动记录选取是结构抗震安全评估基础, 当前, 在地铁隧道的抗震分析研究中, 对水平和竖向地震动, 存在两种主要的选取方式^[9]: (1) 首先选取水平向地震动, 然后选取与其相对应的竖向地震动记录; (2) 首先基于水平向规范谱选取水平向地震动记录, 然后基于抗规中的比例(水平: 竖向=1: 0.65), 将水平向地震动进行缩放, 得到竖向地震动记录. 现阶段, 在地铁隧道结构抗震分析里, 针对地震动的选取, 较少涉及将水平与竖向地震动记录联合匹配目标谱(规范谱^[10]、一致危险谱、条件谱等)的选取方式^[11].

地震动强度参数(intensity measure, IM)作为衔接地震危险性分析与结构地震响应评估的关键纽带, 基于相关性、有效性、实用性和效益性原则合理选择地震动强度参数, 可以减小抗震分析中数据离散性, 并提高计算效率和精度. 在目前面向地下工程结构的地震易损性分析中, 一些学者开展了水平向地震动作用下最优强度参数评价研究^[12~15], 研究发现地震动强度参数PGA (peak ground acceleration)或PGV (peak ground velocity)是适用于水平向地震动作用下地下工程结构的最优地震动强度参数, 但已有研究中备选地震动强度参数相对较少, 可能会导致抗震分析结果失准. 另外, 现有研究只考虑水平向地震动记录, 没有综合考虑竖向地震动记录对最优地震动强度参数评价影响.

基于上述研究背景, 本文开发了基于多目标优化算法的水平和竖向地震动联合选取方法, 面向隧道结构水平和竖向规范谱, 联合选取能够同时匹配水平和竖向规范谱的地震动记录, 基于选取得到的地震动记

录, 采用相关性、有效性、实用性和效益性准则, 开展水平和竖向地震动作用下隧道结构最优强度参数分析, 基于最优强度参数, 建立水平和竖向地震动作用下隧道结构地震易损性曲线, 最后评估水平和竖向地震动作用下隧道结构抗震安全能力, 具体研究流程图如图1所示. 研究结果为水平和竖向地震动联合作用下隧道结构抗震设计与评估提供参考.

2 地铁隧道模型的建立和验证

2.1 工程概况

本文以沈阳某地铁沿线隧道结构为研究对象, 该

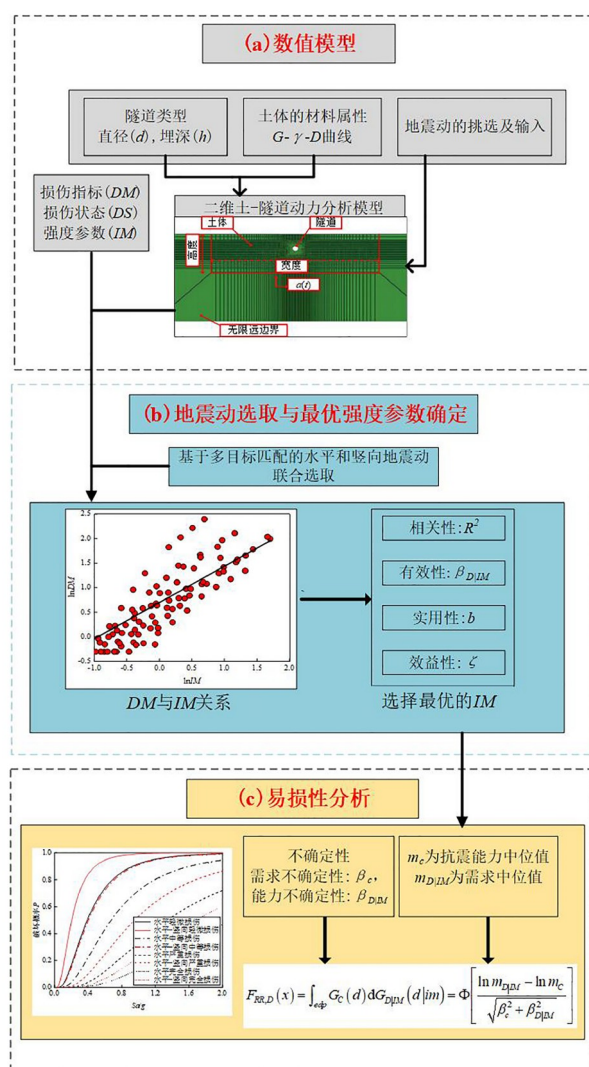


图1 (网络版彩图)本文技术路线图

Figure 1 (Color online) Technology roadmap of this paper.

隧道结构位于地下20.4 m处, 管片的直径和厚度分别为6.2和0.35 m, 衬砌采用C50混凝土, 隧道结构弹性模量和泊松比分别为3.45 GPa和0.2, 截面的配筋面积为2512 mm².

由沈阳某地铁沿线的地勘报告可知, 隧道结构周围地质层主要由杂填土、粗砂土和圆砂土构成. 在勘察过程中采用工程测量、钻探、人工挖探、原位测试(如标准贯入试验、圆锥动力触探试验、波速测试等)、室内土工试验、电阻率测试以及水文地质试验等综合方法, 对各方法所获取的信息进行综合分析评价后编写勘探报告. 根据勘探报告可知, 深度53 m以上土层力学参数详细数据如表1所示, 其中, 剪切模量衰减和阻尼比模型曲线如图2所示(剪切模量衰减和阻尼比数据将用于后续隧道衬砌截面地震响应解析计算方法中).

2.2 地铁隧道结构有限元模型建立

基于有限元软件ABAQUS, 本文建立了地铁隧道结构数值分析模型, 如图3所示: 衬砌采用B21单元, 弹性模量和泊松比分别设置为34.5 GPa和0.2, 土体采用CPE4R单元, 衬砌与土体接触采用ABAQUS相互作用模块中面面接触, 接触面的法向和切向接触行为设置为硬接触和罚摩擦. 衬砌结构采用了线弹性材料, 基于摩尔-库仑屈服准则对土体塑性模型进行计算分析, 计算时采用土的动参数作为计算参数, 其中, 摩尔-库仑屈服准则需要在ABAQUS材料属性模块设置土体黏聚力 c 和土体摩擦角 φ . 模型土体材料数据具体参见表1.

根据《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[16]要求: 在采用时程分析方法进行计算时, 模型侧面人工边

界与地下结构之间距离不应小于地下结构水平有效宽度的三倍, 并确保与结构之间的距离至少是地下结构竖向有效高度的三倍. 本文土-结构相互作用模型宽度设置为200 m, 高度设置为53 m.

隧道结构模型时程分析需要设置两个分析步: 静力地应力平衡分析步和动力隐式分析步. 地应力平衡分析步的目的是保留初始应力且消除模型中的初始位移, 通常情况下, 最大水平位移为10⁻⁴ m以下即满足上述要求; 同时, 在地应力平衡分析步中, 需要固定模型侧向边界水平向位移、限制模型底部节点水平向和垂直向位移. 动力隐式分析步是地应力平衡后隧道结构动力时程分析过程: 首先需要去掉位于模型侧边与底部的固定约束, 同时将无限元边界施加于模型侧向和底部, 然后确定人工基岩面(人工基岩面是地面至剪切波速都超过500 m/s且其下面每一层岩石剪切波速都不应低于500 m/s的土层, 本文的人工基岩面位于地下53 m (模型底部)), 最后采用振动法进行地震动荷载输入, 在模型底部输入水平和竖向地震动加速度时程.

2.3 地铁隧道结构有限元模型验证

2.3.1 无限元边界效应验证

为了验证本文模型无限元边界效果, 对土体的上表面单元输入如图4所示激励, 选取相同的3个时间节点, 通过位移场, 对比有无无限元两种边界对波的反射情况. 图5(a)~(c)为不使用无限元边界位移场, 图6(a)~(c)为使用无限元边界位移场, 可以看出: 当波未传达到模型边界时, 即在0.0115 ms之前, 模型的波形图完全一致; 在波接触模型边界时, 未使用无限元边界的模型在边界处出现了明显的反射波, 而使用无限元边界的模型没有出现反射波. 由此可见使用无限元边界

表 1 土层力学参数
Table 1 Soil mechanical parameters

编号	土层	层厚 (m)	重度 (kN/m ³)	动弹性模量 (MPa)	动泊松比	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
1	杂填土ZTT01	3.9	18.4	98.5	0.43	0	8
2	中粗砂YL-01	5.6	19.4	283.1	0.40	0	20
3	圆砾 DT-02	6.3	20.5	346.5	0.38	0	38
4	中粗砂YL-04	15.4	20.7	483.6	0.39	0	28
5	圆砾 DT-03	5.1	22	555.9	0.47	0	35
6	中粗砂BM-04	7.2	21.8	603.2	0.42	0	32
7	含粉质黏土圆砾 GY-03	9.5	21.8	783.6	0.46	0	28

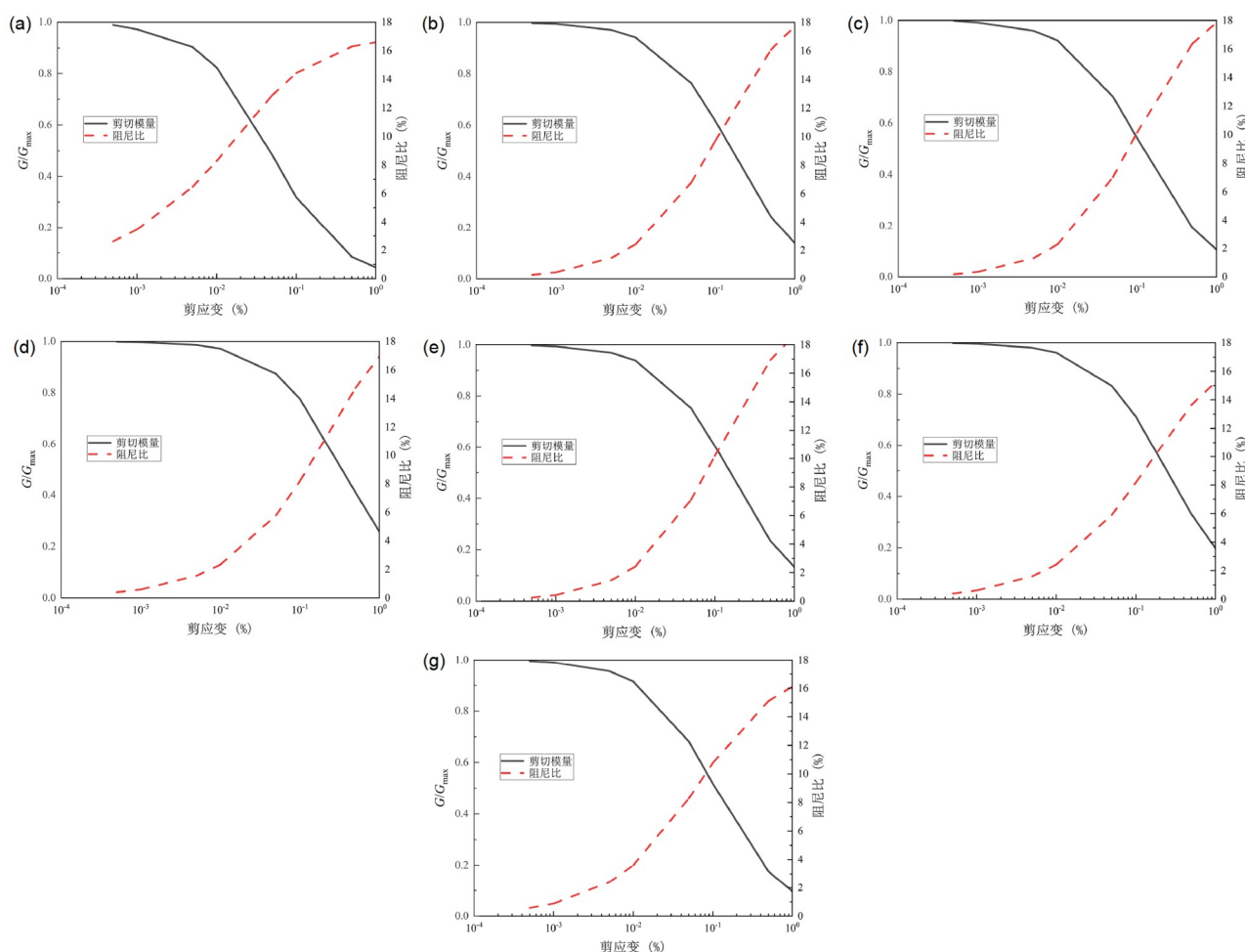


图 2 (网络版彩图)土体剪切模量衰减和阻尼比模型。(a) 杂填土ZTT01; (b) 中粗砂YL-01; (c) 圆砾 DT-02; (d) 中粗砂YL-04; (e) 圆砾 DT-03; (f) 中粗砂BM-04; (g) 含粉质黏土圆砾GY-03

Figure 2 (Color online) Soil shear modulus attenuation and damping ratio models. (a) Mixed fill soil ZTT01; (b) medium-coarse sand YL-01; (c) round gravel DT-02; (d) medium-coarse sand YL-04; (e) round gravel DT-03; (f) medium-coarse sand BM-04; (g) silty clay gravel GY-03.

能更好模拟无限域介质, 减少人工边界对于波的反射影响。

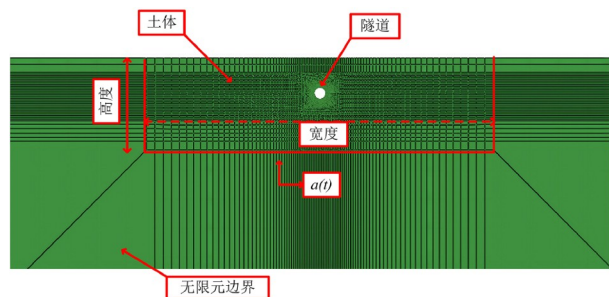


图 3 (网络版彩图)有限元模型

Figure 3 (Color online) Finite element model.

2.3.2 有限元模型与解析解比较验证

研究人员提出了一些隧道衬砌截面地震响应解析计算方法。

Wang^[17]提出了地震作用下圆形隧道与方形隧道弯矩 M 、轴力 T 的计算公式, 该方法考虑了土与结构相互作用, 计算公式可具体表示如下。

(1) 完全滑移状态

$$T = -\frac{1}{6}K_1 \frac{E_m}{(1+V_m)} r \gamma_{\max} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right),$$

$$M = -\frac{1}{6}K_1 \frac{E_m}{(1+V_m)} r^2 \gamma_{\max} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right),$$

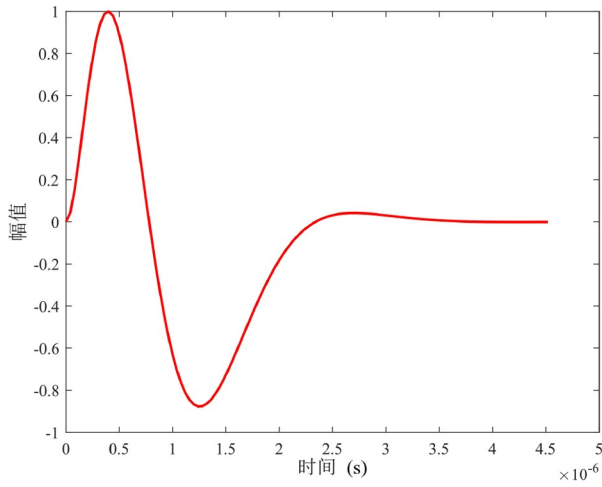


图 4 (网络版彩图)施加的荷载激励
Figure 4 (Color online) Applied load excitation.

式中, $\gamma_{\max}$ 为与隧道圆心同深度处的最大剪切应变; θ 为与衬砌某一部分与水平轴相差的角度; K_1 的具体取值应按以下公式:

$$K_1 = \frac{12(1-\nu_m)}{2F+5-6\nu_m}.$$

(2) 无滑移状态

$$T = -K_2 \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} r \gamma_{\max} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right),$$

式中, 参数 K_2 为

$$K_2 = 1 +$$

$$\frac{F(1-2\nu_m)(1-c)-0.5(1-2\nu_m)^2 C+2}{F[(3-2\nu_m)+(1-2\nu_m)C]+C(2.5-8\nu_m+6\nu_m^2)+6-8\nu_m}.$$

Wang^[17] 没有给出无滑移条件下弯矩值, 按完全滑移状态下弯矩求解公式进行计算.

Park^[18] 通过引入接触系数 D 考虑完全滑移和无滑移两种情况, 提出了隧道结构在地震作用下轴力、弯矩计算公式, 可具体表示为

$$M = \frac{-(1-\nu_m)E_m \gamma_{\max} r^2}{(1+\nu_m)\Delta''} \left\{ 2+(1-2\nu_m)C+4+\frac{4E_m D}{r(1+\nu_m)} \right\} \times \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right),$$

$$T = \frac{-(1-\nu_m)E_m \gamma_{\max} r}{(1+\nu_m)\Delta''} \left\{ 2F+(1-2\nu_m)C+4+\frac{4E_m D}{r(1+\nu_m)} \right\} \times \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right),$$

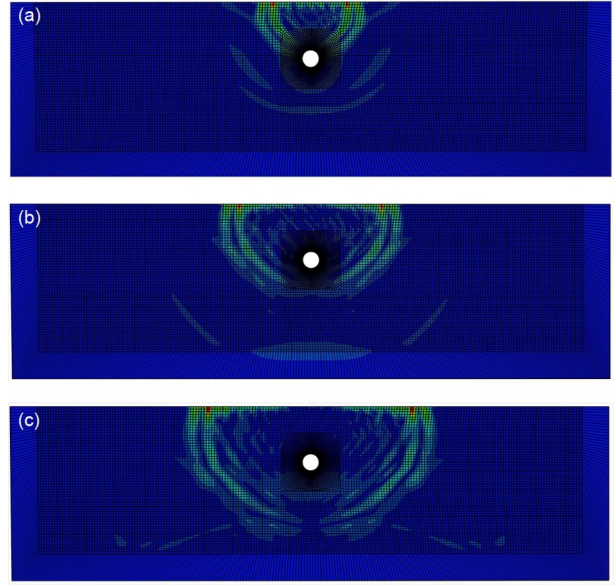


图 5 (网络版彩图)不使用无限元边界0.007, 0.0115和0.0155 ms时刻位移场. (a) 0.007 ms位移场; (b) 0.0115 ms位移场; (c) 0.0155 ms位移场

Figure 5 (Color online) Displacement fields at 0.007, 0.0115, and 0.0155 ms without infinite element boundaries. (a) 0.007 ms displacement field; (b) 0.0115 ms displacement field; (c) 0.0155 ms displacement field.

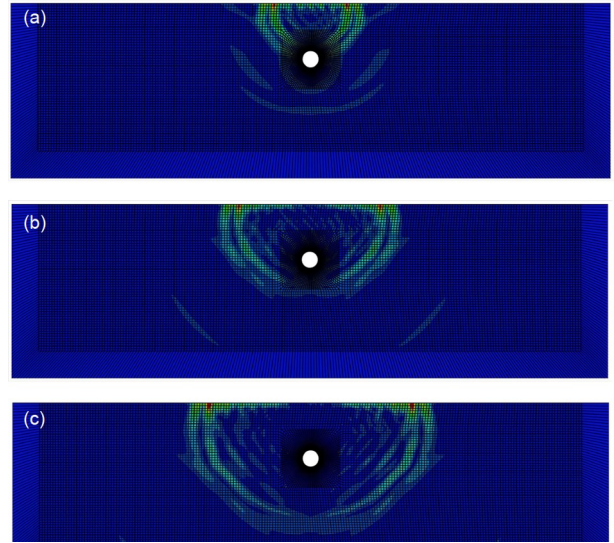


图 6 (网络版彩图)使用无限元边界0.007, 0.0115和0.0155 ms时刻位移场. (a) 0.007 ms位移场; (b) 0.0115 ms位移场; (c) 0.0155 ms位移场

Figure 6 (Color online) Displacement fields at 0.007, 0.0115, and 0.0155 ms with infinite element boundaries. (a) 0.007 ms displacement field; (b) 0.0115 ms displacement field; (c) 0.0155 ms displacement field.

式中, 参数 Δ'' 的表达式为

$$\Delta'' = CF(1-2v_m) + F(3-2v_m) + C(2.5-8v_m+6v_m^2) + 6-8v_m + 2D \frac{(2F+5-6v_m)E_m}{r(1+v_m)}.$$

Penzien^[19]基于梁单元假设, 提出了隧道结构内力与变形计算公式, 可具体表示如下.

(1) 完全滑移状态

$$M = -\frac{3E_p I R^n r \gamma_{\max}}{2r^2(1-v_l^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right),$$

$$T = -\frac{3E_p I R^n r \gamma_{\max}}{2r^3(1-v_l^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right),$$

式中, R^n 的表达式为

$$R^n = \frac{4(1-v_m)}{(\alpha^n+1)}, \quad \alpha^n = \frac{3E_p(5-6E_m)}{2r^3 G_m(1-v_l^2)}.$$

(2) 无滑移状态

$$T = -\frac{2(1-v_m)}{(F+3-4v_m)(1+v_m)} \gamma_{\max} r \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right),$$

$$M = -\frac{2(1-v_m)}{(F+3-4v_m)(1+v_m)} \gamma_{\max} r^2 \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right).$$

上述三种方法基本假设包括: (1) 隧道衬砌假设为弹性梁; (2) 土体为弹性均匀土层; (3) 隧道与结构受静力剪切荷载; (4) 不考虑地表和衬砌的初始应力.

基于隧道衬砌关键截面时程分析结果和解析计算结果, 本文绘制了衬砌 45° 截面处弯矩和轴力数值解与解析解对比图, 如图7所示, 结果表明: (1) 数值解与解析解结果相差不大, 并且在完全滑移的情况下, 三种方法计算的解析解完全相同; (2) 在无滑移情况下, 三种方法计算的解析解不同, Wang方法计算解析解最大, Penzien方法计算解析解次之, Park计算解析解最小;

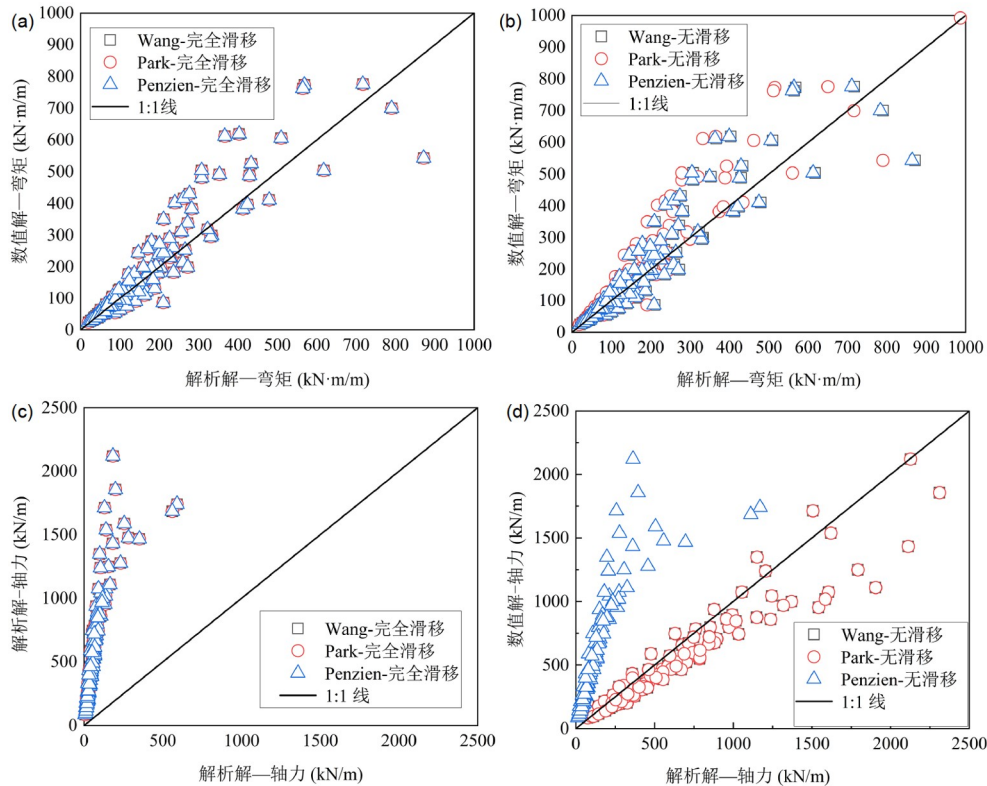


图7 (网络版彩图) 45° 处衬砌截面弯矩和轴力数值与解析解对比. (a) 界面完全滑移时的弯矩对比; (b) 界面无滑移时的弯矩对比; (c) 界面完全滑移时的轴力对比; (d) 界面无滑移时的轴力对比

Figure 7 (Color online) Comparison between numerical and analytical solutions for bending moments and axial forces in lining sections at 45° . (a) Comparison of bending moments with full interface slip; (b) comparison of bending moments with without interface slip; (c) comparison of axial forces with full interface slip; (d) comparison of axial forces with without interface slip.

(3) 在完全滑移和无滑移两种情况下, 通过将弯矩数值解与解析解进行比较, 发现两者结果都相当接近, 上述结果证实了数值模型的计算准确性; (4) 图7(c)显示了隧道衬砌关键截面45°处轴力数值解与完全滑移情况下的解析解比较结果, 数值解与解析解差距较大, 数值解远远大于解析解, 但在完全滑移情况下, 三种方法计算得到的解析解完全相同; (5) 图7(d)显示了衬砌45°截面处轴力数值解与无滑移情况下的解析解比较结果, Wang与Park方法计算得到的解析解基本一致, 并且上述两种方法解析解与数值解差距较小, 证明了数值解的合理性; (6) 数值解与解析解会有一定偏差, 导致数值解与解析解产生偏差的原因为: 解析解方法假设隧道周围土体为弹性均匀土层, 无法反映土体塑性变形引起的应力重分布问题. 上述结果与Kontoe等^[20]研究结论一致, 综上, 可以得出结论: 本文建立的数值模拟模型具有较好模拟精度, 可用于后续地震易损性分析.

3 隧道结构抗震相关参数选取

3.1 水平和竖向地震动联合选取

3.1.1 地下工程结构水平和竖向设计谱确定

本文针对沈阳地区某隧道结构进行研究, 为建立该地区水平和竖向规范谱, 相关参数确定过程和内容可总结如下: (1) 依据《中国地震动参数区划图》, 确定II类场地的设计地震动峰值加速度 $a_{\max}$ 为0.1 g; (2) 基于《中国地震动参数区划图》中地震动反应谱特征周期分区表, 确定场地设计地震动加速度反应谱特征周期 T_g 为0.35 s; (3) 确定场地设计地震动加速度反应

谱中动力放大系数峰值 β_m 为2.5; (4) 结构阻尼比定为0.05, η 为1.0; (5) 水平向设计地震动加速度为0.1 g, 基于抗震规范, 确定竖向地震动峰值加速度与水平方向峰值加速度的比值为0.7. 水平和竖向规范谱如图8所示.

3.1.2 基于水平向目标谱的地震动记录选取

现有地震动选取方法^[21]主要针对水平向目标谱进行匹配挑选. 在本文研究中, 首先借鉴上述选取方式, 将水平向规范谱设定为匹配目标, 运用多目标优化算法进行地震动记录的选取研究, 选取结果如图9所示. 选取结果显示: 当以水平向规范谱作为匹配目标, 并运用多目标优化算法时, 所选出的水平向地震动中位值能够与规范谱实现较好匹配, 然而, 与之对应的竖向地震动反应谱中位值却无法与竖向规范谱达成良好匹配.

3.1.3 基于水平和竖向目标谱的地震动记录选取

考虑到3.1.2节中地震动记录选取方法存在缺陷, 本文选用了一种能水平和竖向地震动记录同时匹配水平和竖向规范谱的地震动记录选取方法, 该方法的基本原理和选取步骤可总结如下.

水平向目标谱与各条备选地震动记录的误差平方权重总和可表示为

$$SSE = \sum_{j=1}^P [\ln Sa_H(T_j) - \ln Sa_H^{\text{Simulation}}(T_j)]^2 \times w + \sum_{k=1}^P [\ln Sa_V(T_k) - \ln Sa_V^{\text{Simulation}}(T_k)]^2 \times (1-w), \quad (1)$$

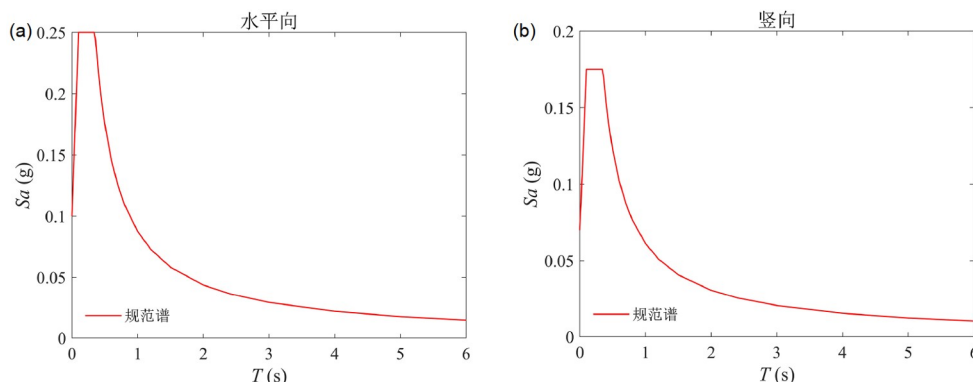


图8 (网络版彩图)水平和竖向规范谱. (a) 水平向规范谱; (b) 竖向规范谱

Figure 8 (Color online) Horizontal and vertical canonical spectrum. (a) Horizontal canonical spectrum; (b) vertical canonical spectrum.

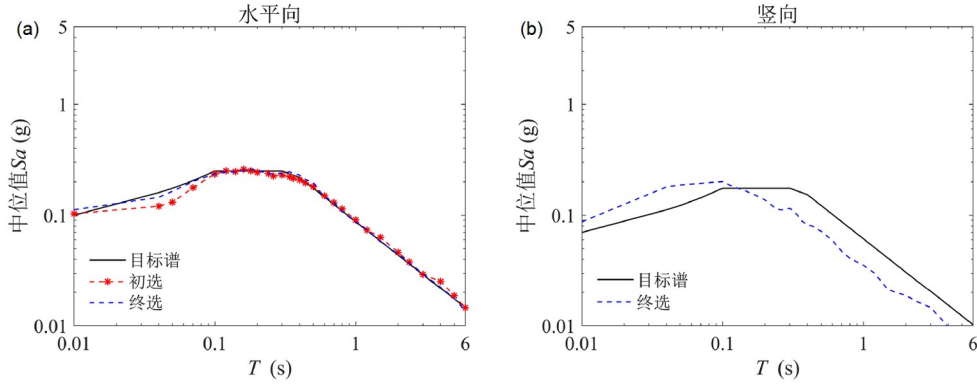


图9 (网络版彩图)基于水平向目标谱的水平和竖向地震动选取结果. (a) 水平向 Sa 中位值匹配; (b) 竖向 Sa 中位值匹配

Figure 9 (Color online) The selection results of horizontal and vertical ground motion based on horizontal target spectra. (a) Horizontal median Sa matching; (b) vertical median Sa matching.

式中, $\ln Sa_H(T_j)$ 代表从实际地震数据中选取的水平向地震动记录在周期 T_j 处的对数谱加速度值, $\ln Sa_H^{\text{Simulation}}(T_j)$ 代表模拟生成的水平向地震动在周期 T_j 的对数谱加速度; $\ln Sa_V(T_k)$ 代表选取的竖向地震动记录在周期的 T_k 对数谱加速度; $\ln Sa_V^{\text{Simulation}}(T_k)$ 代表模拟竖向地震动在周期 T_k 的对数谱加速度值; P 代表考虑的周期总数; w 是用于权衡竖向谱匹配与水平向谱匹配过程的权重系数, 其取值影响着二者在计算中的相对重要性.

针对备选的水平地震动, 其均值的最大百分数误差可用以下方式表示:

$$Err_{\text{mean}_H} = \max_j \left(\frac{|m_{\ln Sa_H}(T_j) - \ln Sa_H^{\text{Simulation}}(T_j)|}{\ln Sa_H^{\text{Simulation}}(T_j)} \right) \times 100, \quad (2)$$

式中, $m_{\ln Sa_H}(T_j)$ 表示备选水平地震动记录在周期 T_j 时对数谱加速度的平均值; $\ln Sa_H^{\text{Simulation}}(T_j)$ 表示水平向模拟地震动在周期 T_j 时的对数谱加速度数值.

针对备选的竖向地震动, 其均值的最大百分数误差可用以下方式表示:

$$Err_{\text{mean}_V} = \max_j \left(\frac{|m_{\ln Sa_V}(T_j) - \ln Sa_V^{\text{Simulation}}(T_j)|}{\ln Sa_V^{\text{Simulation}}(T_j)} \right) \times 100, \quad (3)$$

式中, $m_{\ln Sa_V}(T_j)$ 表示备选竖向地震动记录在周期 T_j 时对数谱加速度的平均值; $\ln Sa_V^{\text{Simulation}}(T_j)$ 表示竖向模拟地

震动在周期 T_j 时的对数谱加速度数值.

针对备选的水平及竖向地震动, 其均值的最大误差, 可用以下方式表示:

$$Err_{\text{mean}} = Err_{\text{mean}_H} \times w + Err_{\text{mean}_V} \times (1 - w). \quad (4)$$

当需运用多目标优化算法进一步改善样本与目标均值和方差之间的匹配时. 在这种算法中, 先前选择的每个地震动都会一次替换为数据库中的备选地震动, 从而在目标与样本均值和方差之间的匹配中得到最佳改善. 如果没有任何可能的替换导致改进, 则保留原始地震动. 水平及竖向地震动记录的平均误差平方和可表示为

$$SSE_S = \sum_{j=1}^P \left[\left(m_{\ln Sa_H}(T_j) - \ln Sa_H^{\text{Simulation}}(T_j) \right)^2 * w + \left(m_{\ln Sa_V}(T_j) - \ln Sa_V^{\text{Simulation}}(T_j) \right)^2 * (1 - w) \right], \quad (5)$$

式中, SSE_S 指代的是权重误差和, w 则表示为权重系数.

基于2.1.1节确定的水平和竖向规范谱, 进行水平和竖向地震动联合选取, 具体步骤包括: (1) 确定水平和竖向目标谱, 本文将水平和竖向规范谱设定为目标谱. (2) 借助蒙特卡罗模拟抽样方法, 构建水平与竖向地震动记录的模拟谱. (3) 载入地震动记录, 本研究选用NGA-West2作为备选地震动记录的数据库. (4) 初步筛选地震动, 本文隧道所在地为沈阳地区, 根据初筛条件(V_{s30} 设置为200到300 m/s之间、震级为5到8级之间、震中距为200 km以内), 从NGA-West2中选择出

379组地震动记录. (5) 基于式(1), 对水平和竖向地震动与水平和竖向模拟谱之间的误差平方和进行计算, 从初步筛选出的地震动数据库中, 挑选出与模拟谱最为匹配的水平及竖向地震动记录. (6) 基于式(2)~(4), 判断备选的水平及竖向地震动记录平均值, 与水平和竖向模拟谱均值之间的最大偏差, 是否超出了预先设定的阈值. 如果误差超过阈值, 那么将进入步骤(7) (基于多目标优化算法地震动优选处理), 如果没有超过设定阈值, 则直接输出选出的水平和竖向地震动记录. (7) 基于式(5), 采用多目标优化方法, 对水平和竖向地震动记录进行优选处理, 获取更加匹配水平和竖向规范谱的水平及竖向地震动记录, 把初步选定的地震动记录里的部分记录, 更替为筛选数据库内适用的地震动数据, 继而进一步判断替换后的水平与竖向地震动记录是否达到设定阈值. (8) 输出最终选定的水平和竖向地震动记录. 按照上述选取流程, 得出基于水平和竖向规范谱的地震动选取结果. 结果如图10所示, 结果表明: 将水平和竖向规范谱同时设定为匹配目标, 通过采用多目标优化算法, 所选水平地震动反应谱中位值与水平规范目标谱、竖向地震动反应谱中位值与竖向规范目标谱, 均0.01能实现良好匹配结果.

3.2 面向地震需求的地铁隧道最优强度参数确定

3.2.1 备选地震动强度参数

本文参考王晓磊等人^[22]给出的36个地震动强度参数为备选强度参数, 进行最优强度参数评价. 基于强度参数的定义及其表达式, 可以将地震强度参数分为四大类: 时程相关、频谱相关、强震持续时间相关和

其他类型, 具体定义表达式见文献^[22].

3.2.2 水平向地震动作用下地铁隧道最优强度参数评价

基于相关性、有效性、实用性和效益性原则^[5], 采用弯矩承载能力比为工程需求参数^[6](描述结构地震响应及损伤的参数(engineering demand parameter, EDP)), 计算水平向地震作用下IM与EDP间相关性、有效性、实用性和效益性分析结果, 具体如图11~14所示. 结果表明: (1) 峰值速度 PGV 是时程相关型指标中最优IM, 频谱相关型IM整体相差不大, 速度复合强度 I_V 是强震持时型IM中最优强度参数, 其他类型地震动强度参数不适合预测水平地震作用下地铁隧道结构的动力响应; (2) 从相关性最优强度判别指标来看, 峰值速度 PGV 与工程需求参数的相关性最强, 除了峰值位移 PGD (peak ground displacement)、均方根位移 D_{rms} 、方根位移 D_{rs} 、 I_D 和其他类型地震动强度参数相关性较差, 其余地震动强度参数的相关性基本一致; (3) 从效益性最优强度判别指标来看, 与频谱型相关的地震动强度参数都表现较好, 优于其他三种类型的地震动强度参数. 综上可知, 速度复合强度 I_V 是水平地震作用下最优地震动强度参数, 其次为峰值速度 PGV 和 I_F .

3.2.3 水平-竖向地震动联合作用下地铁隧道最优强度参数评价

基于相关性、有效性、实用性和效益性原则^[5], 采用弯矩承载能力比为地震需求参数^[6], 计算水平和竖向地震动作用下IM与EDP间相关性、有效性、实

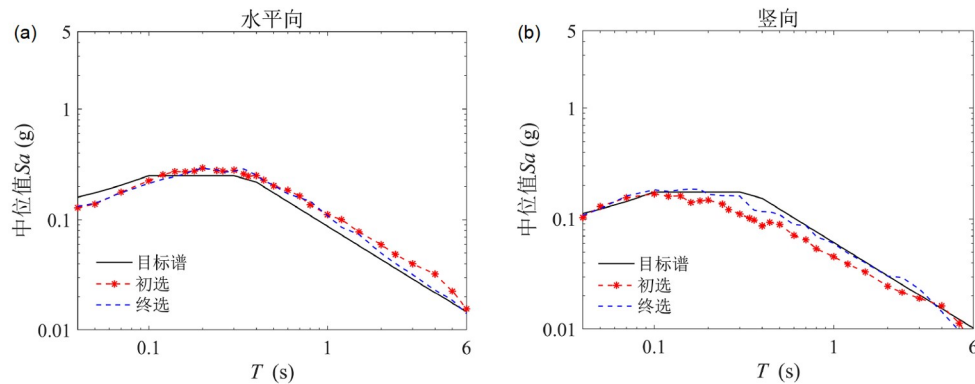


图 10 (网络版彩图)基于水平和竖向目标谱的水平和竖向地震动选取结果. (a) 水平向 Sa 中位值匹配; (b) 竖向 Sa 中位值匹配
Figure 10 (Color online) The selection results of horizontal and vertical ground motions based on horizontal and vertical target spectra. (a) Horizontal median Sa matching; (b) vertical median Sa matching.

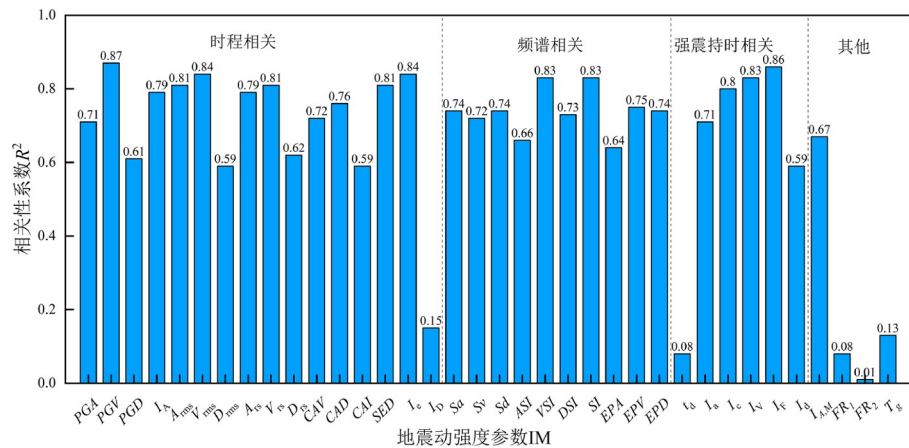


图 11 (网络版彩图)水平地震作用下不同地震动强度参数与结构地震响应指标的相关性计算结果
Figure 11 (Color online) The calculation results of correlation between different IMs and EDPs under horizontal seismic action.

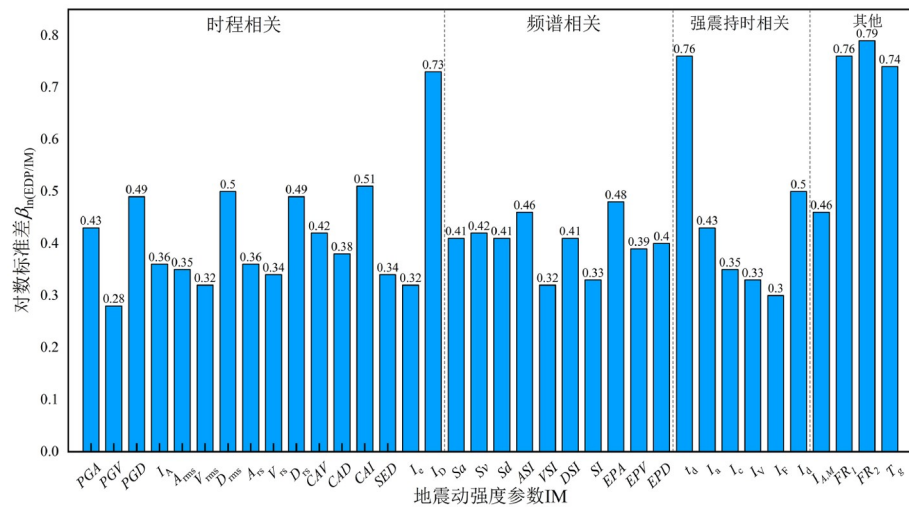


图 12 (网络版彩图)水平地震作用下不同地震动强度参数与结构地震响应指标的有效性计算结果
Figure 12 (Color online) The calculation results of effectivity between different IMs and EDPs under horizontal seismic action.

用性和效益性分析结果, 具体如图15~18所示。结果表明: 与工程需求参数最相关的三个地震动强度参数分别为速度谱强度 VSI (velocity spectrum intensity)、谱加速度 Sa 和谱位移 Sd ; 前两个最有效地震动强度参数分别为峰值速度 PGV 和 I_e (两者的对数标准差均为0.2), 上述两个强度参数同为时程相关型指标, I_F 和速度谱强度 VSI 的有效性紧随其后(对数标准差均为0.21), SI (spectrum intensity)的对数标准差为0.22, 其有效性位于第三位; 水平-竖向地震动联合作用下前三个最为实用的IM为速度符合强度 I_V 、均方根加速度 A_{rms}

和方根加速度 A_{rs} ; 速度复合强度 I_V 是效益性最好的IM。效益性指标是对实用性和有效性的综合考量, 是一种较为完善的地震动强度参数评价方法, 效益性指标对强度参数性能影响最大, 基于以上分析结果, 得出结论: 速度复合强度 I_V 为水平-竖向地震动联合作用下地铁隧道结构最优地震动强度参数, I_F 与峰值速度 PGV 则紧随其后。

综上所述: 水平-竖向地震动联合作用下地震动强度参数评价结果与水平地震作用下结果基本一致, 无论在何种加载方式下, 速度复合强度 I_V 都为地铁隧道

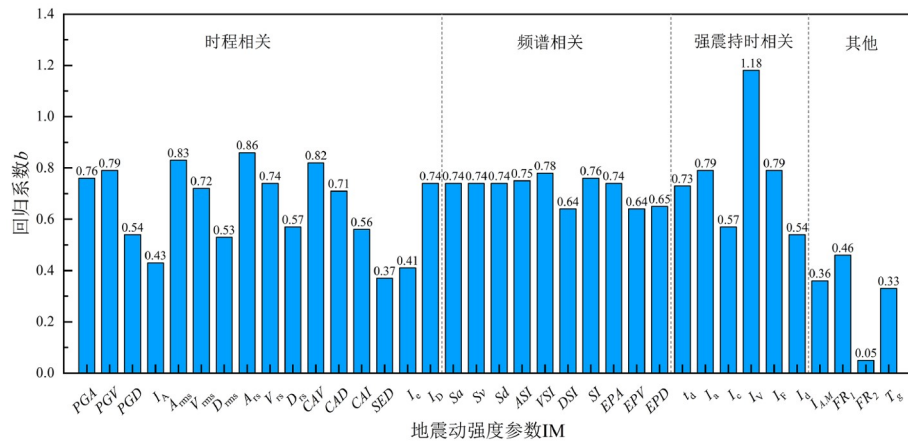


图 13 (网络版彩图)水平地震作用下不同地震动强度参数与结构地震响应指标的实用性计算结果

Figure 13 (Color online) The calculation results of practicability between different IMs and EDPs under horizontal seismic action.

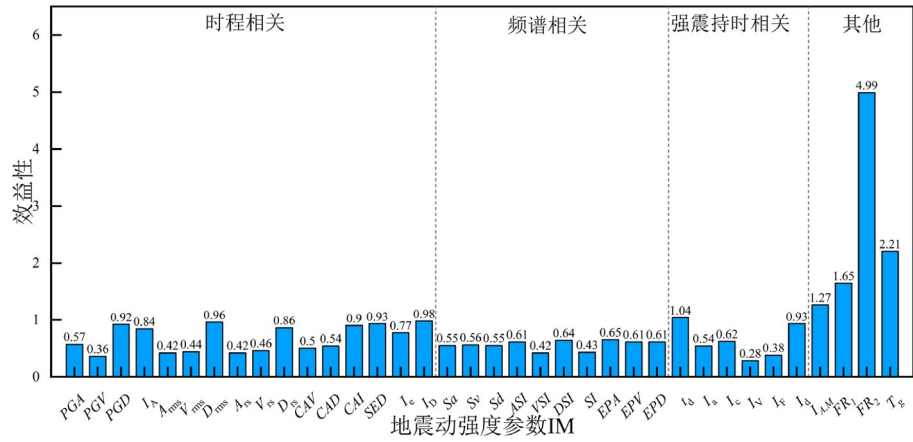


图 14 (网络版彩图)水平地震作用下不同IM与EDP的效益性计算结果

Figure 14 (Color online) The calculation results of profitability between different IMs and EDPs under horizontal seismic action.

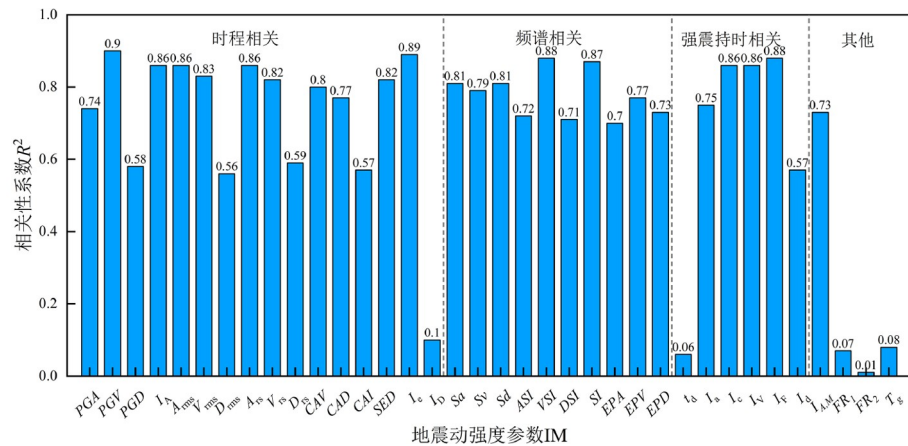


图 15 (网络版彩图)水平-竖向地震动联合作用下不同地震动强度参数与结构地震响应指标的相关性计算结果

Figure 15 (Color online) The calculation results of correlation between different IMs and EDPs under joint horizontal and vertical seismic action.

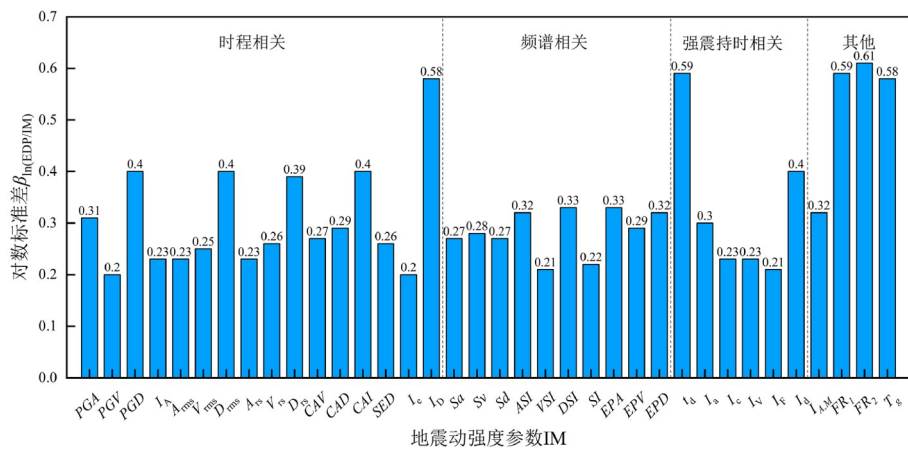


图 16 (网络版彩图)水平-竖向地震动联合作用下不同地震动强度参数与结构地震响应指标的有效性计算结果
Figure 16 (Color online) The calculation results of effectivity between different IMs and EDPs under joint horizontal and vertical seismic action.

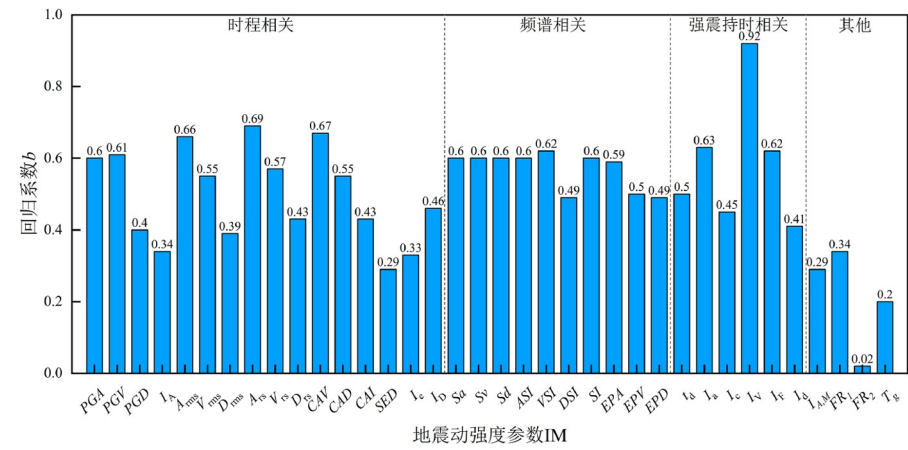


图 17 (网络版彩图)水平-竖向地震动联合作用下不同地震动强度参数与结构地震响应指标的实用性计算结果
Figure 17 (Color online) The calculation results of practicability between different IMs and EDPs under joint horizontal and vertical seismic action.

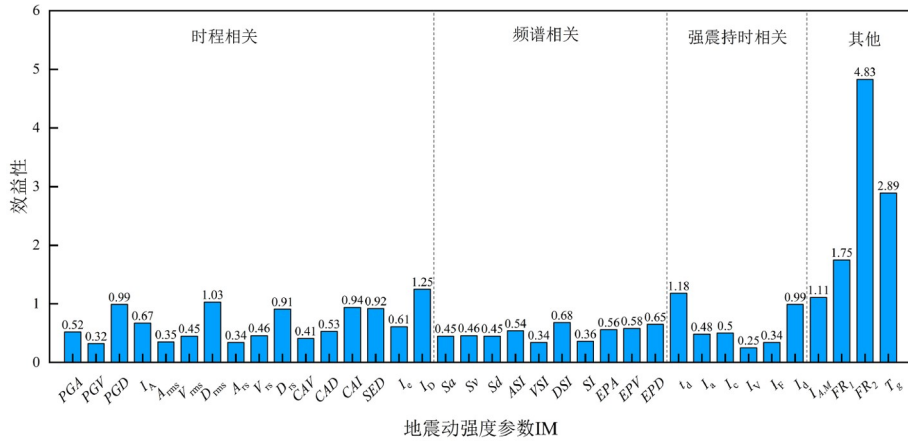


图 18 (网络版彩图)水平-竖向地震动联合作用下不同IM与EDP的效益性计算结果
Figure 18 (Color online) The calculation results of profitability between different IMs and EDPs under joint horizontal and vertical seismic action.

结构最优地震动强度参数; 两种地震输入模型对有效性的评价结果会造成较小影响, 在水平地震作用下, 前两个最有效的地震动强度参数分别为峰值速度 PGV 和 I_F , 均方根速度 V_{rms} , I_e 和速度谱强度 VSI 的对数标准差均为 0.32, 并列位于第三位, 在水平-竖向地震动联合作用下, 前两个最有效的地震动强度参数分别为峰值速度 PGV 和 I_e (两者的对数标准差均为 0.2), I_F 和速度谱强度 VSI 的有效性紧随其后 (对数标准差均为 0.21), SI 的对数标准差为 0.22, 其有效性位于第三位. I_e 是与输入能量有关的地震动强度参数, 在水平-竖向地震动联合作用下, 输入地铁隧道结构的能量较高, 所以 I_e 在水平-竖向地震动联合作用下的有效性较高, 即 I_e 在水平-竖向地震动联合作用下的有效性高于 I_F , 这也是有效性评价结果会产生差异的原因.

4 水平和竖向地震动作用下地铁隧道地震易损性分析及抗震安全评估

4.1 地铁隧道结构损伤状态定义

结构损伤状态定义是地震易损性分析的关键环节, 本文选择弯矩承载能力比为损伤指标^[6], 该指标为隧道衬砌关键截面弯矩(衬砌45°截面弯矩)与衬砌弯矩承载能力之比, 其中, 隧道衬砌关键截面弯矩通常通过有限元模型非线性时程分析得到, 弯矩承载力通常根据规范计算得到. 基于确定的弯矩承载能力比损伤指标, 隧道结构可分为五个不同等级的损伤状态, 分别为无损伤、轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全损伤, 如表2所示.

4.2 地震易损性函数定义

基于位移的易损性函数是将易损性分析分解为需求分析和能力分析两部分, 将相对复杂地震易损性分

析转化为较为简单的形式. 当采用基于位移的地震易损性函数时, 需遵循结构地震需求与能力均服从对数正态分布的假设. 基于位移的地震易损性函数表达式为

$$F_{RR,D}(x) = \int_{edp} G_C(d) dG_{D|IM}(d|im) \\ = \Phi \left[\frac{\ln m_{D|IM} - \ln m_C}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{D|IM}^2}} \right] \quad (6)$$

式中, $F_{RR,D}(x)$ 为仅考虑本质不确定性的地震易损性函数. $m_{D|IM}$, m_C 与 β_C , $\beta_{D|IM}$ 分别表示地震需求和结构抗震能力的中位值和标准差.

4.3 水平和竖向地震动作用下地铁隧道结构地震易损性分析

根据上述有限元数值分析结果, 可以绘制水平和竖向地震动作用下弯矩承载能力比与所选择的地震强度参数关系图, 如图19和20所示.

拟合曲线代表随地震强度增加损伤指标的演化过程. 基于上述损伤指标演化关系及表3中给出的损伤状态划分, 可计算 $m_{D|IM}$ 和 $\beta_{D|IM}$, 建立水平和竖向地震动作用下地铁隧道结构地震易损性曲线, 其中, 包括轻微损伤、中等损伤、严重损伤、完全损伤几个极限状态, 具体如图21所示. 结果表明: (1) 随着地震动强度增大, 隧道各个破坏状态下的超越概率增高; (2) 考虑竖向地震作用后, 各个损伤状态下结构的破坏概率增加. 为了揭示两种地震输入模型条件下易损性曲线的差异, 隧道结构在不同极限状态下的抗震能力中位值(分别以速度复合强度 I_V 、谱加速度 S_a 和峰值速度 PGV 为地震动强度参数)如表4、5和6所示, 可发现: 采用 I_V 为地震动强度参数时, 水平地震动作用和水平-竖向地震动联合作用下的地震易损性函数能力中位值最大差异为 34.8%. 两者之间的差距随着损伤状态的增加而减小. 当处于完全损伤状态下, 差异为 12.5%. 当采用峰值速度 PGV 、谱加速度 S_a 这两个地震动强度参数时, 同样会出现上述规律.

4.4 基于地震易损性的地铁隧道抗震安全评估

本文采用“安全裕度比^[23](safety margin ratio, SMR)”概念, 对小震、中震、大震作用下地铁隧道结构抗震安全性进行评估, 针对上述三个地震水准,

表 2 损伤状态定义^[6]

Table 2 Definitions of damage states

损伤状态 ds	损伤指标范围 DI	损伤指标中间值
无损伤 ds_0	$M/M_{Ra} \leq 1.0$	—
轻微损伤 ds_1	$1.0 \leq M/M_{Ra} \leq 1.5$	1.25
中等损伤 ds_2	$1.5 \leq M/M_{Ra} \leq 2.5$	2.00
严重损伤 ds_3	$2.5 \leq M/M_{Ra} \leq 3.5$	3.00
完全损伤 ds_4	$M/M_{Ra} \geq 3.5$	—

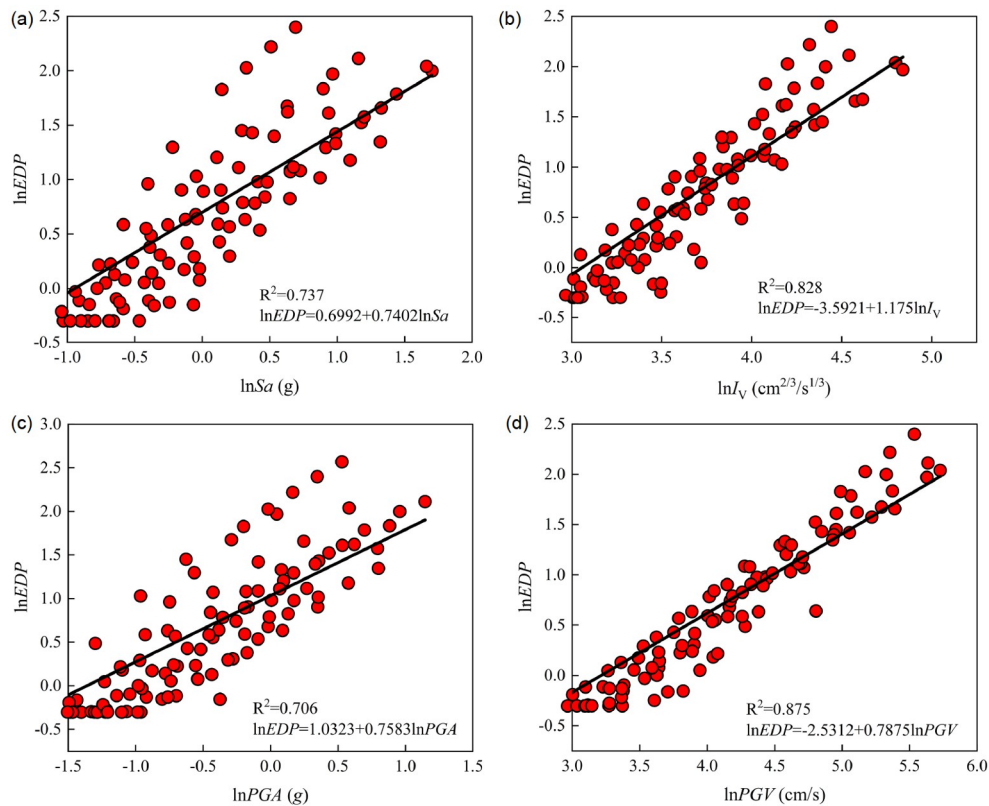


图 19 (网络版彩图)水平地震作用下不同地震动强度参数回归分析结果. (a) $\ln S_a$ - $\ln EDP$; (b) $\ln I_v$ - $\ln EDP$; (c) $\ln PGA$ - $\ln EDP$; (d) $\ln PGV$ - $\ln EDP$

Figure 19 (Color online) Regression analysis results of different ground motion intensity measures under horizontal seismic action. (a) $\ln S_a$ - $\ln EDP$; (b) $\ln I_v$ - $\ln EDP$; (c) $\ln PGA$ - $\ln EDP$; (d) $\ln PGV$ - $\ln EDP$.

SMR的表达式可表示如下:

$$SMR_{i,FE} = \frac{m_{R,i}}{S_{a,FE}} (i = 1, 2, 3, 4), \quad (7)$$

$$SMR_{i,DBE} = \frac{m_{R,i}}{S_{a,DBE}} (i = 1, 2, 3, 4), \quad (8)$$

$$SMR_{i,MCE} = \frac{m_{R,i}}{S_{a,MCE}} (i = 1, 2, 3, 4), \quad (9)$$

式中, $SMR_{i,FE}$, $SMR_{i,DBE}$ 和 $SMR_{i,MCE}$ 分别为多遇地震、

设计地震和罕遇地震作用下结构安全裕度比, $m_{R,i}$ ($i=1, 2, 3, 4$)分别对应轻微损伤、中等损伤、严重损伤、完全损伤四个极限状态的抗震能力中位值, $S_{a,FE}$, $S_{a,DBE}$ 和 $S_{a,MCE}$ 分别表示多遇地震、设防地震和罕遇地震作用下的谱加速度强度.

基于需求分析中得到的抗震能力中位值, 并结合式(7)~(9), 可计算地铁隧道结构在多遇地震、设计地震、罕遇地震作用下的安全裕度比, 计算结果如表3,

表 3 多遇地震作用下的安全裕度比

Table 3 Safety margin ratio under the frequently occurring earthquake

损伤状态	水平	水平-竖向	相差比率 (%)
轻微损伤	4.44	2.33	47.43
中等损伤	7.68	4.61	39.97
严重损伤	15.32	10.87	29.04
完全损伤	24.14	19.12	20.783

表 4 不同极限状态抗震能力中位值($I_v/(\text{cm}^{2/3} \text{s}^{-1/3})$)

Table 4 Median value of seismic resistance capacity in different limit states ($I_v/(\text{cm}^{2/3} \text{s}^{-1/3})$)

损伤状态	水平	水平-竖向	相差比率 (%)
轻微损伤	21.26	13.86	34.8
中等损伤	30.02	21.52	28.3
严重损伤	46.38	37.48	19.1
完全损伤	61.75	54.00	12.5

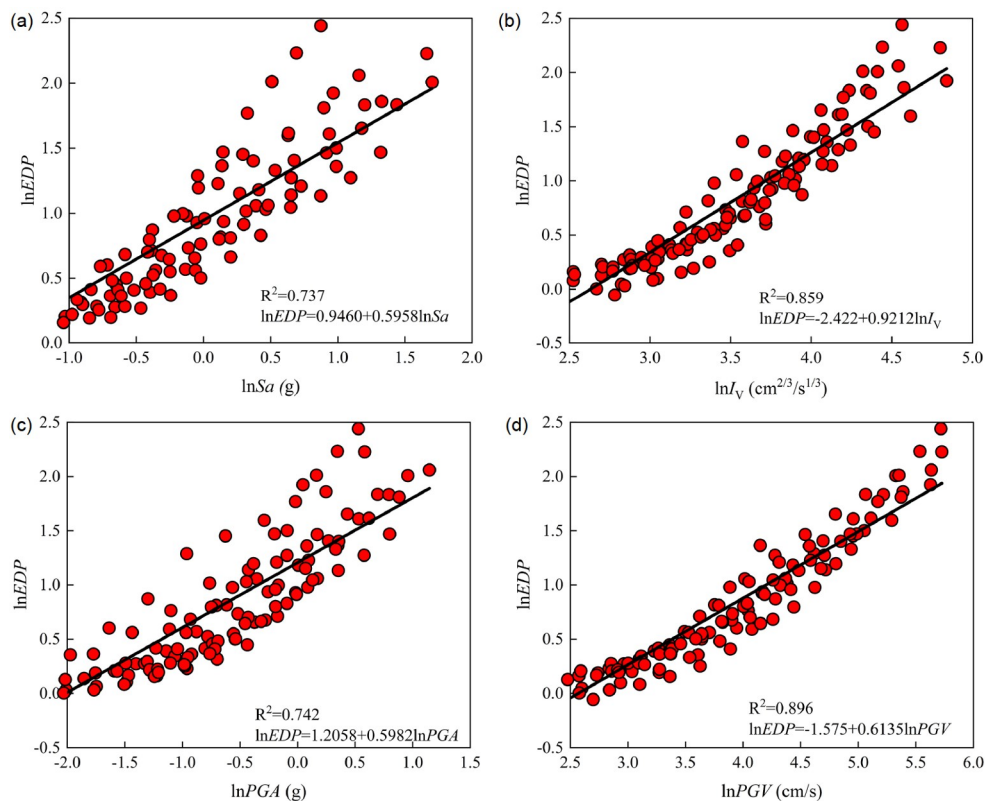


图 20 (网络版彩图)水平-竖向地震动联合作用下不同地震动强度参数回归分析结果. (a) $\ln S_a$ - $\ln EDP$; (b) $\ln I_V$ - $\ln EDP$; (c) $\ln PGA$ - $\ln EDP$; (d) $\ln PGV$ - $\ln EDP$

Figure 20 (Color online) Regression analysis results of different ground motion intensity measures under joint horizontal and vertical seismic action. (a) $\ln S_a$ - $\ln EDP$; (b) $\ln I_V$ - $\ln EDP$; (c) $\ln PGA$ - $\ln EDP$; (d) $\ln PGV$ - $\ln EDP$.

7和8所示, 分析结果表明: (1) 多遇地震的 $SMR >$ 设计地震的 $SMR >$ 罕遇地震的 SMR , 表明随着地震动强度的增大, 结构抵抗破坏的能力减小; (2) 在不同的极限状态下, 结构的安全裕度满足: 完全损伤状态 $SMR >$ 严重损伤状态 $SMR >$ 中等损伤状态 $SMR >$ 轻微损伤状态 SMR ; (3) 水平地震作用下轻微损伤的安全裕度比都大于1, 中等损伤的安全裕度比都大于1.7, 严重损伤的安

全裕度比都大于3.4, 完全损伤的安全裕度比都大于5.4, 表明随着损伤等级提高, 地铁隧道安全裕度也更高, 基于我国规范设计的隧道结构具有更强抵抗“完全损伤”的能力; (4) 水平地震作用下和水平-竖向地震动联合作用下结构的安全裕度比相差较大, 最大相差比率发生在轻微损伤状态时, 达到47.43%, 最小相差比率发生在完全损伤时, 达到20.78%, 随着损伤等级的

表 5 不同极限状态抗震能力中位值($PGV/(\text{cm s}^{-1})$)

Table 5 Median value of seismic resistance capacity in different limit states ($PGV/(\text{cm s}^{-1})$)

损伤状态	水平	水平-竖向	相差比率 (%)
轻微损伤	24.89	13.04	47.60
中等损伤	41.66	25.25	39.39
严重损伤	79.70	58.06	27.15
完全损伤	122.19	100.48	17.76

表 6 不同极限状态抗震能力中位值(Sa/g)

Table 6 Median value of seismic resistance capacity in different limit states (Sa/g)

损伤状态	水平	水平-竖向	相差比率 (%)
轻微损伤	0.38	0.20	47.36
中等损伤	0.67	0.40	40.29
严重损伤	1.34	0.95	29.10
完全损伤	2.11	1.67	20.85

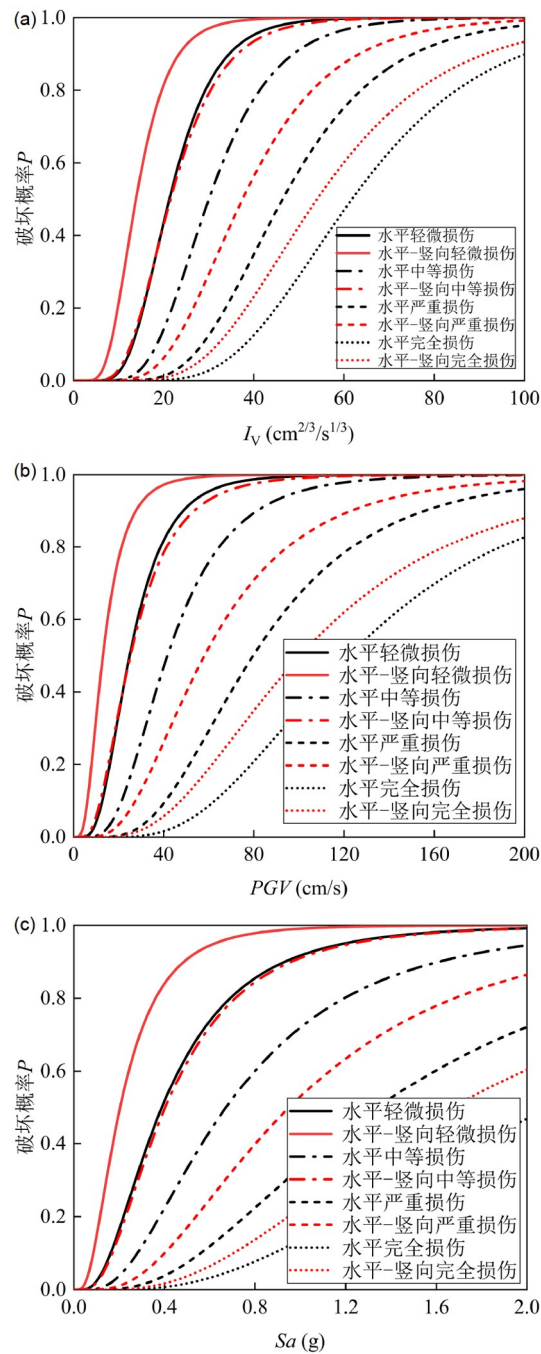


图 21 (网络版彩图)不同地震动强度参数水平和水平-竖向地震动联合作用下地震易损性曲线。(a) 以 I_V 为地震动强度参数的易损性曲线; (b) 以 PGV 为地震动强度参数的易损性曲线; (c) 以 S_a 为地震动强度参数的易损性曲线

Figure 21 (Color online) Seismic fragility curves under different ground motion intensity measures and combined horizontal-vertical ground motions. (a) The vulnerability curve with I_V as the parameter of ground motion intensity; (b) vulnerability curve with PGV as the parameter of ground motion intensity; (c) the vulnerability curve with S_a as the parameter of ground motion intensity.

表 7 设计地震作用下的安全裕度比

Table 7 Safety margin ratio under the design earthquake

损伤状态	水平	水平-竖向	相差比率 (%)
轻微损伤	2.22	1.17	47.43
中等损伤	3.84	2.31	39.97
严重损伤	7.66	5.44	29.04
完全损伤	12.07	9.56	20.783

表 8 罕遇地震作用下的安全裕度比

Table 8 Safety margin ratio under rarely occurring earthquake

损伤状态	水平	水平-竖向	相差比率 (%)
轻微损伤	1.01	0.53	47.43
中等损伤	1.74	1.04	39.97
严重损伤	3.48	2.47	29.04
完全损伤	5.48	4.34	20.783

提高, 水平和水平-竖向地震动联合作用下安全裕度比的相差比率逐渐减小; (5) 水平和竖向地震动联合作用下的安全裕度比小于单独水平地震动作用下的安全裕度比, 水平-竖向罕遇地震动联合作用下的安全裕度比仅仅只有0.53, 上述结果表明竖向地震动对结构的抗震能力中位值造成很大影响, 即竖向地震动将对结构安全性造成很大影响, 隧道结构在水平和竖向地震动联合作用下更容易破坏。

5 结论

本文开发了基于多目标优化算法的水平和竖向地震动联合选取方法, 面向隧道结构水平和竖向规范谱, 联合选取能够同时匹配水平和竖向规范谱的地震动记录, 基于选取得到的地震动记录, 采用相关性、有效性、实用性和效益性准则, 开展水平和竖向地震动作用下隧道结构最优强度参数分析, 基于最优强度参数, 建立水平和竖向地震动作用下隧道结构地震易损性曲线, 最后评估水平和竖向地震动作用下隧道结构抗震安全能力。主要得到以下结论。

(1) 将水平和竖向规范谱同时设定为匹配目标, 通过采用多目标优化算法, 所选水平地震动反应谱中位值与水平规范目标谱、竖向地震动反应谱中位值与竖向规范目标谱, 均能实现良好匹配结果, 克服了以水平向规范谱为单目标的不足。

(2) 两种地震动输入模式(水平向地震动、水平-竖向地震动)对最优强度参数评估影响不大, 无论在何种加载方式下, 速度复合强度 I_v 都为地铁隧道结构最优地震动强度参数。

(3) 水平-竖向地震动联合作用下隧道结构易损性

破坏概率显著高于水平地震动作用下隧道结构易损性破坏概率。

(4) 水平-竖向地震动联合作用下隧道结构的安全裕度显著小于水平向地震作用下隧道安全裕度, 竖向地震动对地铁隧道结构安全性造成很大影响。

参考文献

- Shen W H, Ding Z D, Zi H. Seismic response and structural safety analysis of layered soil shield tunnel under strong earthquake (in Chinese). *Bull Sci Technol*, 2022, 38: 9–13, 19 [沈万虎, 丁祖德, 资昊. 强震下成层土盾构隧道地震响应及结构安全性分析. 科技通报, 2022, 38: 9–13, 19]
- Xu A Q, Liang J W, Ba Z N. Seismic influence of upper-soft and lower-hard site on large diameter shield tunnel (in Chinese). *Earthq Eng Eng Dyn*, 2023, 43: 12–21 [徐安全, 梁建文, 巴振宁. 上软下硬场地中大直径盾构隧道地震响应分析. 地震工程与工程振动, 2023, 43: 12–21]
- Wang J. Transverse seismic response analysis of the shield tunnel under horizontal and vertical bidirectional earthquake loading (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020 [王杰. 盾构隧道在水平及竖向双向地震作用下的横向地震响应研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2020]
- Yang C F, Wang W, Zhang L, et al. Response analysis of tunnel under near-field bidirectional ground motion (in Chinese). *J Lanzhou Jiaotong Univ*, 2024, 43: 16–23 [杨楚凡, 王伟, 张磊, 等. 近场双向地震动输入的隧道响应分析. 兰州交通大学学报, 2024, 43: 16–23]
- Huang Z K, Pitilakis K, Argyroudis S, et al. Selection of optimal intensity measures for fragility assessment of circular tunnels in soft soil deposits. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 2021, 145: 106724
- Huang Z K, Pitilakis K, Tsiniadis G, et al. Seismic vulnerability of circular tunnels in soft soil deposits: The case of Shanghai metropolitan system. *Tunn Undergr Space Technol*, 2020, 98: 103341
- Yu H T, Li X X, Yuan Y, et al. Seismic vulnerability analysis method for longitudinal response of immersed tunnels (in Chinese). *China J Highw Transp*, 2022, 35: 13–22 [禹海涛, 李心熙, 袁勇, 等. 沉管隧道纵向地震易损性分析方法. 中国公路学报, 2022, 35: 13–22]
- Liu G, Geng P, Wang T, et al. Seismic fragility curves of circular tunnels in saturated sand. *Eng Fail Anal*, 2024, 157: 107938
- Qiu D P, Chen J Y, Wang W M, et al. Fragility analysis of underground large-scale frame structures considering seismic effects of vertical earthquakes (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2023, 45: 2537–2546 [邱大鹏, 陈健云, 王文明, 等. 考虑竖向地震作用的大型地下框架结构易损性分析. 岩土工程学报, 2023, 45: 2537–2546]
- Huang Z, Argyroudis S, Zhang D, et al. Time-dependent fragility functions for circular tunnels in soft soils. *ASCE-ASME J Risk Uncertainty Eng Syst Part A-Civ Eng*, 2022, 8: 04022030
- Zhang J H, Huang Z K, Liu X Y, et al. Fragility analysis of tunnel structures based on the vector-valued intensity measures (in Chinese). *J Civ Environ Eng*, 2022, 44: 57–66 [张建辉, 黄忠凯, 刘祥勇, 等. 基于矢量地震动强度参数的隧道结构易损性分析. 土木与环境工程学报, 2022, 44: 57–66]
- Zhong Z L, Shen Y Y, Zhen L B, et al. Ground motion intensity measures and dynamic response indexes of metro station structures (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2020, 42: 486–494 [钟紫蓝, 申铁尧, 甄立斌, 等. 地震动强度参数与地铁车站结构动力响应指标分析. 岩土工程学报, 2020, 42: 486–494]
- Zhang C M, Zhong Z L, Zhen L B, et al. Seismic intensity measures for the damage evaluation of circular tunnels (in Chinese). *Eng Mech*, 2021, 38: 100–108 [张成明, 钟紫蓝, 甄立斌, 等. 适用于圆形隧道损伤评价的地震动强度参数研究. 工程力学, 2021, 38: 100–108]
- Zhao M, Guo M Y, Zhong Z L, et al. Variation law of optimal seismic peak intensity measures for underground structures with burial depth (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2022, 44: 15–25 [赵密, 郭梦园, 钟紫蓝, 等. 面向地下结构的最优地震动峰值指标随埋深变化规律. 地震学报, 2022, 44: 15–25]
- Jiang J W, Xu C S, Du X L, et al. Optimal index of earthquake intensity measures for seismic design of underground frame structure of shallow-buried subway station (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2023, 45: 318–326 [蒋家卫, 许成顺, 杜修力, 等. 浅埋地铁车站地下框架结构抗震设计的最优地震动强度参数. 岩土工程学报, 2023, 45: 318–326]
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of urban rail transit structures (in

- Chinese). Standard GB50909-2014 [中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构抗震设计规范. 标准GB50909-2014. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2015/art_17339_224158.html]
- 17 Wang J N. Seismic Design of Tunnels: A Simple State-of-the-Art Design Approach. New York: Parsons Brinckerhoff, 1993
- 18 Park K H, Tantayopin K, Tontavanich B, et al. Analytical solution for seismic-induced ovaling of circular tunnel lining under no-slip interface conditions: A revisit. *Tunn Undergr Space Technol*, 2009, 24: 231–235
- 19 Penzien J. Seismically induced racking of tunnel linings. *Earthquake Engng Struct Dyn*, 2000, 29: 683–691
- 20 Kontoe S, Avgerinos V, Potts D M. Numerical validation of analytical solutions and their use for equivalent-linear seismic analysis of circular tunnels. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 2014, 66: 206–219
- 21 Baker J W, Lee C. An improved algorithm for selecting ground motions to match a conditional spectrum. *J Earthquake Eng*, 2018, 22: 708–723
- 22 Wang X L, Wang X M, Yan W D, et al. Correlation analysis of intensity measures of horizontal and vertical ground motions based on Copula function (in Chinese). *Eng Mech*, 2023, 40: 79–92 [王晓磊, 王浠铭, 阎卫东, 等. 基于Copula函数的水平和竖向地震动强度参数相关性分析. *工程力学*, 2023, 40: 79–92]
- 23 Yu X H. Probabilistic seismic vulnerability and risk analysis of reinforced concrete frame structures (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 [于晓辉. 钢筋混凝土框架结构的概率地震易损性与风险分析. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012]

Seismic fragility analysis of subway tunnel under horizontal and vertical ground motions

WANG XiaoLei, SUN Heng, ZHAO ZiXu, HE Wei, HAN ZiAn & YAN WeiDong

School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China

Seismic safety of subway tunnels, considering both horizontal and vertical ground motion and the effects of uncertainty, is insufficiently researched. To delicately consider the seismic safety assessment of subway tunnels under the joint effect of horizontal and vertical ground motion, this paper developed a joint horizontal and vertical ground motion selection method based on a multi-objective optimization algorithm, which is targeted on the horizontal and vertical code spectra of the tunnel structure, and the horizontal and vertical ground motion records were jointly selected to match the both horizontal and vertical code spectra. Based on the criteria of correlation, efficiency, practicability, and profitability, the optimal intensity measure of tunnel structures under horizontal and vertical ground motion was assessed. Based on the optimal intensity measure, the seismic fragility of tunnel structures under horizontal and vertical ground motions was analyzed, and the seismic safety assessment of subway tunnels under horizontal and vertical ground motions was assessed. The analysis results have indicated as follows: the effect of vertical ground motion is relatively insignificant on the assessment of the optimal intensity measures, and the optimal intensity measure of the ground motion is the Velocity Compound Intensity, I_V ; the structural safety margin of the tunnel structure under the joint of horizontal-vertical ground motion is significantly less than that under the horizontal ground motion, and the structural safety of subway tunnels is significantly affected by the vertical ground motion. The results of this study would provide a reference for seismic design and assessment of subway tunnels under multi-dimensional ground motions.

horizontal and vertical ground motion, ground motion selection, subway tunnel, optimal intensity measure, fragility analysis

doi: 10.1360/SST-2025-0010