

上软下硬场地盾构隧道纵向地震响应特性

赵文杰, 祝毅, 汪文杨, 李孝雄

滁州学院智能建造与水利工程学院, 安徽 滁州

收稿日期: 2026年8月3日; 录用日期: 2026年8月27日; 发布日期: 2026年9月2日

摘要

盾构隧道穿过上软下硬非均质场地时的纵向抗震性能直接关系到工程的整体安全。为揭示上软下硬场地中盾构隧道的纵向地震响应特性与致灾机理, 本文以苏通GIL管廊工程为背景, 建立了考虑土-结构非线性相互作用的三维精细化有限元数值模型, 精细还原了管片环缝、纵缝及连接螺栓构造。重点探讨了纵向地震波输入下隧道顶部的纵向变形不均匀性、环缝张开量与错台量的时程演化特征, 以及管片衬砌混凝土的损伤与应力分布规律。研究结果表明: 在上软下硬非均质地层的约束下, 顶底部土体刚度差异导致隧道产生强烈的不均匀弯曲与剪切变形, 顶部环缝张开量与错台量沿纵向呈现明显的波动性; 震后由于上部软弱土层留存较大的残余变形, 隧道顶部环缝在加载结束后仍维持较大的张开状态, 增加了防水失效风险; 管片损伤主要集中在管片接头及拱顶区域。研究成果可为上软下硬场地盾构隧道的抗震设计与差异变形控制提供理论参考。

关键词

上软下硬场地, 纵向地震响应, 环缝张开量, 环缝错台量, 混凝土损伤

Longitudinal Seismic Response Characteristics of Shield Tunnels in Sites with Upper Soft and Lower Hard Soil Layers

Wenjie Zhao, Yi Zhu, Wenyang Wang, Xiaoxiong Li

School of Intelligent Construction and Hydraulic Engineering, Chuzhou University, Chuzhou Anhui

Received: August 3, 2026; accepted: August 27, 2026; published: September 2, 2026

Abstract

The longitudinal seismic performance of shield tunnels passing through non-uniform sites with upper soft and lower hard soil layers directly bears on the overall safety of the engineering project. To

文章引用: 赵文杰, 祝毅, 汪文杨, 李孝雄. 上软下硬场地盾构隧道纵向地震响应特性[J]. 建模与仿真, 2026, 15(9): 22-28. DOI: 10.12677/mos.2026.159130

reveal the longitudinal seismic response characteristics and disaster-causing mechanisms of shield tunnels in such sites, a three-dimensional refined finite element numerical model considering non-linear soil-structure interaction was established based on the Sutong GIL utility tunnel project, meticulously incorporating ring joints, longitudinal joints, and connecting bolt configurations. Under longitudinal seismic wave inputs, the longitudinal deformation non-uniformity at the tunnel crown, time-history evolution characteristics of ring joint opening and offset displacements, as well as compressive damage and stress distribution patterns of the segment lining concrete were emphatically investigated. The results indicate that: under the constraint of non-uniform strata with upper soft and lower hard layers, the stiffness contrast between top and bottom soils leads to pronounced non-uniform bending and shear deformations of the tunnel, with the opening and offset displacements of ring joints at the crown exhibiting obvious fluctuations along the longitudinal direction; post-earthquake, due to significant residual deformations retained in the upper soft soil layer, the ring joint openings at the tunnel crown remain at a relatively high level after loading ceases, thereby elevating the long-term risk of waterproofing failure; damage in segment concrete is primarily concentrated near segment joints and the tunnel crown. The research findings can provide theoretical references for seismic design and differential deformation control of shield tunnels in sites with upper soft and lower hard soil layers.

Keywords

Sites with Upper Soft and Lower Hard Soil Layers, Longitudinal Seismic Response, Ring Joint Opening, Ring Joint Offset, Concrete Damage

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着我国交通与市政基础设施建设的快速推进,盾构隧道作为城市地下交通和越江跨河工程的重要载体,其建设规模与数量呈现出爆发式增长[1][2]。然而,隧道等地下结构并非处于绝对的安全屏障之中,历次强震(如日本阪神地震、我国汶川地震等)的震害调查表明,地下结构在强震作用下同样会遭受严重的结构破坏甚至失稳坍塌[3]。盾构隧道由管片衬砌通过接头螺栓装配而成,其结构整体性受接头非线性特性影响显著,在地震动力作用下易发生管片开裂、环缝错台、螺栓屈服以及防水失效等破坏形态[4]。因此,深入探讨盾构隧道的地震响应特征与致灾机理,对确保地下交通生命线工程的抗震安全具有重要意义。

目前,国内外学者针对复杂地层中盾构隧道的抗震性能已开展了大量研究。在非均质地层方面,既有文献多集中于隧道沿着纵向轴线依次穿越不同地层的“软硬交互/突变场地”,探讨沿轴向的地层刚度差异对结构弯曲与剪切变形的影响[5][6]。然而,对于隧道断面上部与下部处于不同刚度介质中的“上软下硬”这一典型上下分层场地,目前的纵向地震响应研究仍相对匮乏。在这种上软下硬场地中,上下土层模量的巨大差异导致隧道顶底部的土体约束刚度截然不同,在纵向地震波作用下,顶底部土体剪切变形的不协调极易诱发极其复杂的纵向不均匀弯曲与环缝张开错台[7][8]。此外,现有的纵向分析大多采用梁-弹簧或等效连续筒体等简化模型,难以精确刻画上软下硬过渡区管片环缝接头、螺栓受力以及衬砌混凝土局部损伤的纵向演化过程,对于该类场地土-结构纵向相互作用机理的认识仍有待深入。

鉴于此,本文建立了土-结构非线性相互作用的三维精细化有限元模型,系统开展上软下硬场地中盾构隧道的纵向地震响应研究。文中重点分析地震波纵向输入下,软硬地层交界面对隧道纵向位移场与

变形曲率的影响；揭示隧道纵向内力分布、环缝张开量及螺栓受力特性的演化规律；明确上软下硬过渡区域管片衬砌混凝土的应力集中区与潜在损伤破坏机制。研究成果旨在为上软下硬场地下盾构隧道的抗震设计与差异变形控制提供理论支撑。

2. 工程背景

苏通 GIL 管廊工程位于长江下游三角洲平原的前缘地带附近，其地形沿南北方向起伏较大，场地地质剖面与盾构隧道位置如图 1 所示。场地的土层分布极不均匀，不同土层的混合层组成，每一层厚度也在局部变化，不同土层之间交替沉积，软硬交互分布特征显著。隧道外径 11.6 m，内径 10.5 m，管片厚度 0.55 m，单个管片宽度 2 m，单个管环的衬砌环分块形式采用了“7+1”形式，即 1 个封顶块+2 个邻接块+4 个标准块，管片混凝土标号为 C60，单个管环的横截面拼接示意图如图 2 所示。每个环缝均匀布置了 22 根 M40 纵向螺栓，纵缝设有 3 根 M36 环向螺栓，螺栓机械强度均为 10.9 级。

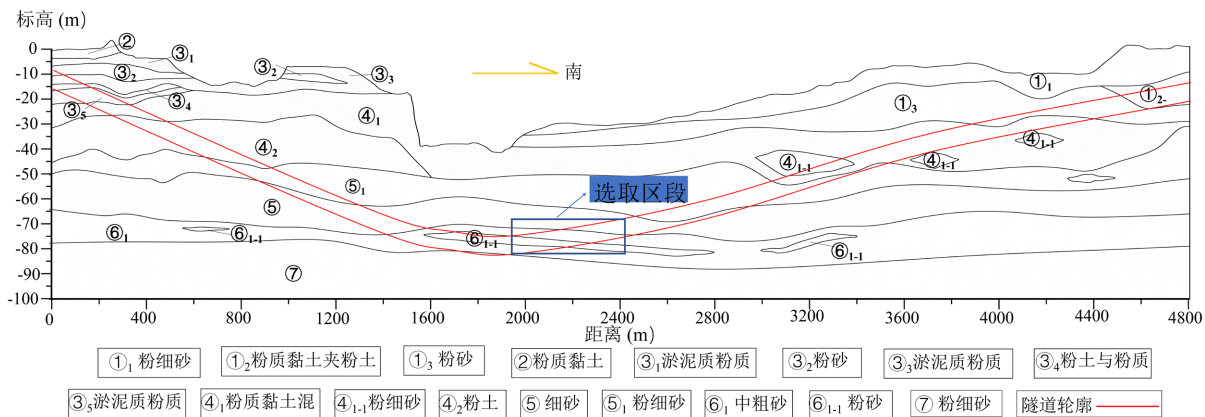


Figure 1. Longitudinal site profile along the tunnel
图 1. 沿隧道纵向场地剖面图

3. 盾构隧道三维有限元模型

3.1. 模型建立

为在保障计算精度的同时兼顾数值分析效率，并有效削减边界效应的影响，本文选取纵向长度为 500 m 的盾构隧道结构作为主要分析对象(图 1)。计算模型整体三维尺寸定为：纵向 500 m、竖向 70 m 及横向 100 m。上覆土层为软弱土层，土层分界面位于隧道腰部位置处。为确保动力响应计算的收敛性与稳定性，土体网格尺寸需严格符合波传播的数值离散要求。参考 Kuhlemeyer 等[9]提出的准则，土体单元尺寸控制在 0.7 m~1.8 m 范围内较为适宜。结合计算效率与离散精度的平衡考虑，本文采取分区域网格划分策略：近结构核心区的网格尺寸精细化至 1 m，远离结构的远场边界区域网格尺寸放大至 2 m，并在二者之间设置尺寸在 1 m~2 m 渐变的过渡网格，以保证应力波传递的连续性与模拟准确度。此外，所建盾构隧道精细化模型真实还原了管片环间及环内的错缝拼装构造与连接螺栓，具体三维有限元模型如图 2 所示。

3.2. 材料本构模型及参数

选用考虑三维应力空间中不规则加卸载的广义 Non-Masing 法则构造的 Davidenkov 本构模型(DCZ 模型)描述土体的动力非线性和滞回性[10]，土层本构模型主要拟合参数参照文献[1]，如表 1 所示。表中， A 、 B 为无量纲指数， γ_0 为土的参考剪应变。

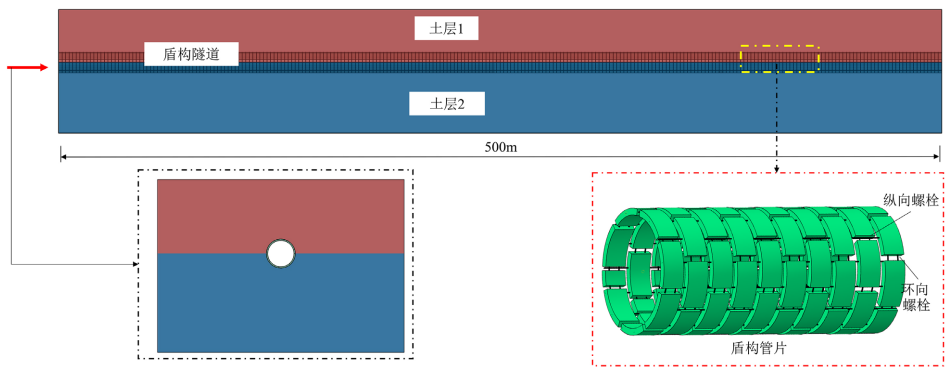


Figure 2. 3D refined model of shield tunnel in sites with upper soft and lower hard soil layers
图 2. 上软下硬场地盾构隧道三维精细化模型

Table 1. Parameters of the constitutive model for soils
表 1. 土层本构模型参数

土层	剪切波速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Davidenkov 本构模型参数		
		A	B	γ_0
土-1	180	1.01	0.39	6.5×10^{-4}
土-2	360	1.20	0.37	7.4×10^{-4}

管片采用的混凝土标号为 C60，其动力本构采用了混凝土损伤塑性模型(Concrete Damaged Plasticity, CDP) [11]，混凝土本构模型参数如表 2 所示。

Table 2. Model parameters of the concrete material
表 2. 混凝土材料模型参数

弹性模量 E_c/GPa	36	膨胀角 $\Psi(^{\circ})$	38.0
泊松比 μ	0.2	偏心率 δ	0.1
初始屈服应力 σ_{co}/MPa	33.27	f_{bo}/f_{co}	1.16
抗压强度 σ_{cu}/MPa	47.57	K_c	2/3
抗拉强度 σ_{tu}/MPa	3.88	粘性系数 u	0.0005

3.3. 输入地震动及计算工况

依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010(2016 年版)), 重要建筑结构分析中应引入近断层地震记录以评估结构在特殊地震动下的响应。因此, 本文选取 Kobe 波、什邡八角波(SFBJ 波)和绵竹清平波(MZQP 波)作为基岩输入地震动。图 3 为各地震动的加速度时程, 将水平向加速度峰值调整为 0.10 g, 竖向加速度峰值为水平向的 0.65 倍[12]。

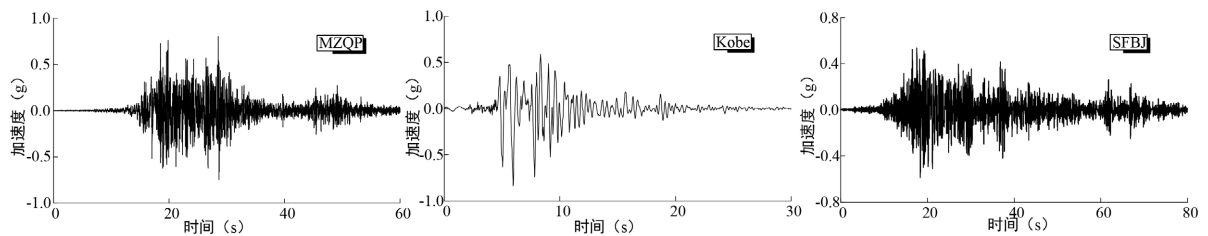


Figure 3. Time-history curves of seismic wave
图 3. 地震波时程曲线

4. 结果与分析

4.1. 张开量与错台量

图 4 展示了地震作用下隧道顶部沿着隧道纵向的环缝张开量与错台量峰值分布特征。分析表明, 受上软下硬场地约束影响, 隧道顶部的环缝张开量与错台量沿纵向呈现出明显的波动性与不均匀性。由于隧道整体处于上部软土与下部硬土的非均质包围中, 结构在纵向地震作用下产生了显著的不均匀弯曲与剪切变形。此外, 盾构隧道在 Kobe 波作用下, 环间张开量和错台量均大于其他两种工况, 这一现象可能与地震波的频率有关。

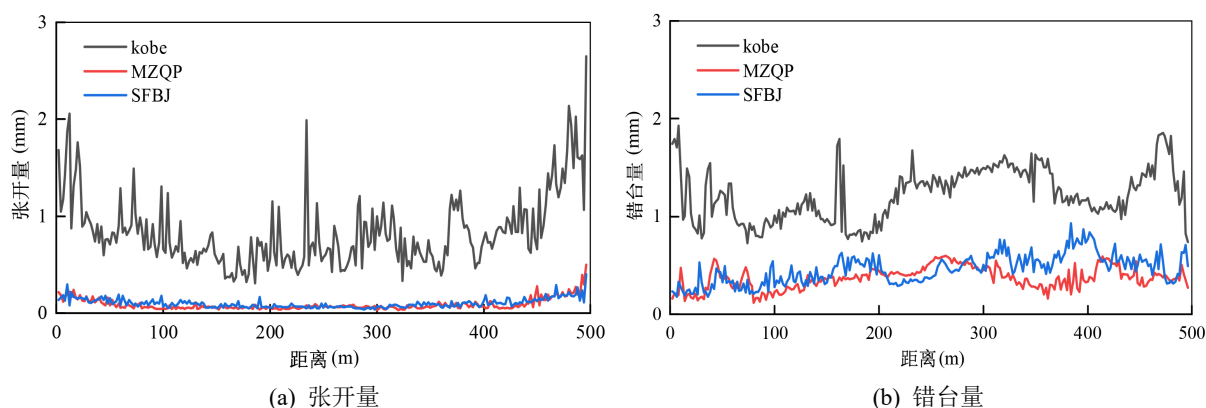


Figure 4. Longitudinal ring joint opening and offset of tunnel

图 4. 隧道纵向环缝张开量及其错台量

图 5 展示了典型位置处环缝张开量与错台量的时程响应演化过程。从响应过程来看, 环缝张开与错台的峰值响应主要集中在地震波能量强烈的时段(约 6.0 s 时刻), 且二者在时间曲线上呈现出显著的同步与耦合特征。值得注意的是, 在加载结束时刻, 隧道顶部的环缝张开量依然维持在较高水平, 而底部的张开量则相对较小; 这一现象除与结构本身的不可逆塑性变形及韧性响应有关外, 最核心的原因在于上软下硬地层条件的约束差异——上部软弱土层在地震后留存了较大的残余位移与变形, 而下部较硬土层对隧道的约束与恢复能力较强, 从而使得顶部环缝在震后仍处于较大的张开状态, 增加了防水失效的长期风险。

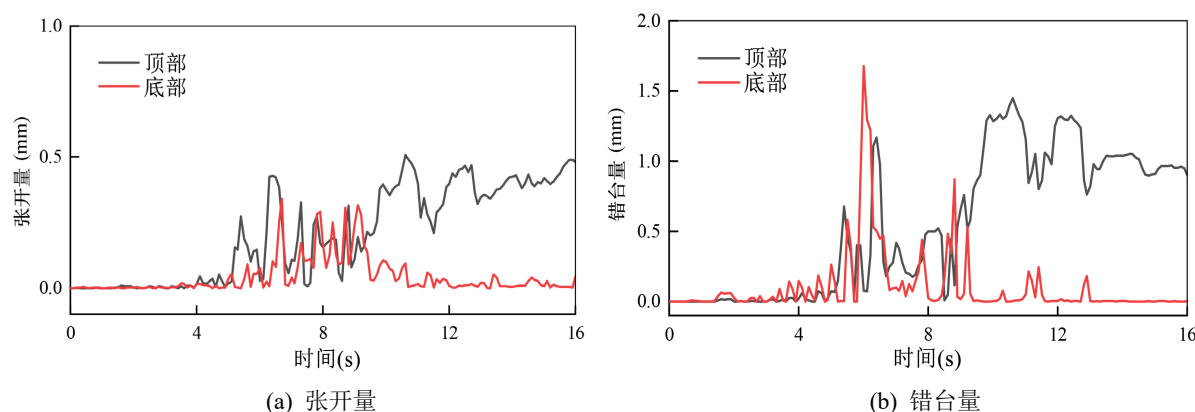


Figure 5. Time-history curves of ring joint opening and offset

图 5. 环缝张开量及其错台量时程曲线

4.2. 结构损伤与应力分布

图 6 给出了地震作用下盾构隧道衬砌管片的受拉损伤(DAMAGET)分布云图及局部截面放大图。结合云图可以看出,衬砌结构的损伤受上软下硬地层的约束影响极为显著,混凝土受拉损伤主要集中在上软下硬场地的过渡区域以及管片接头附近。截面损伤放大图表明,由于隧道上部土体约束较弱,拱顶及相邻近区域在弯曲与挤压作用下承受了较大的塑性变形,致使拱顶局部位置出现了较为明显的混凝土受拉损伤,DAMAGET 值达到了较大数值。

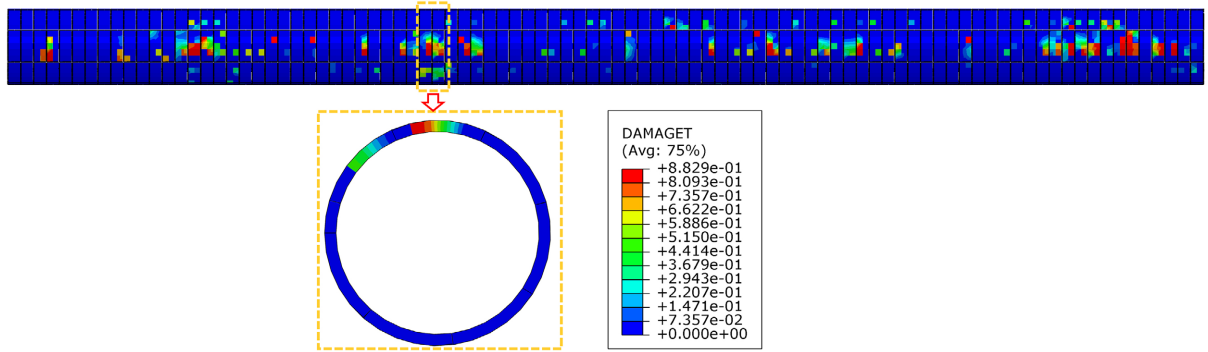


Figure 6. Tensile damage cloud map
图 6. 受拉损伤云图

图 7 对比展示了张开量峰值时刻(6.0 s)与地震结束时刻(16.0 s)隧道管片的环向应力(S22)分布情况。在加载时刻(6.0 s),管片截面内的应力分布呈现出强烈的非对称性,拱顶与拱腰区域的应力集中现象十分剧烈,拉压应力随地震动频繁交替重分布。至地震结束时刻(16.0 s),由于混凝土材料已发生不可逆的塑性损伤及环缝残余错台,管片内部仍保留了较高的残余应力,这一结果表明在上软下硬场地中不仅需加强环缝纵向螺栓的连接性能,还应对拱顶等易受损部位采取局部强化与韧性提升措施。

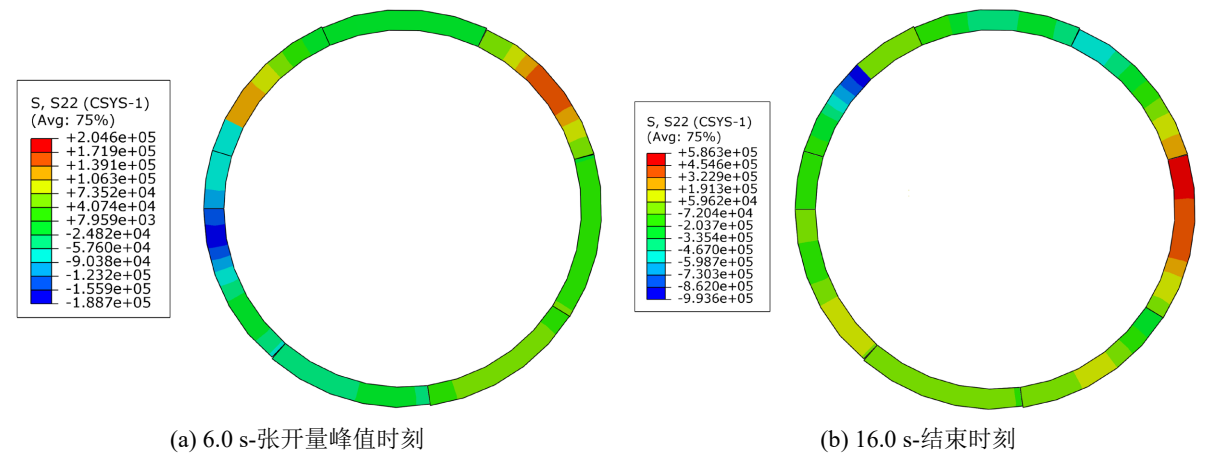


Figure 7. Circumferential stress of tunnel segment
图 7. 隧道管片环向应力

5. 结论

本文建立了上软下硬场地中盾构隧道精细化三维有限元数值模型,探讨了纵向地震作用下隧道的变形特征、环缝张开错台规律以及管片损伤与应力分布状态,得到以下主要结论:

1) 受上软下硬非均质场地约束的影响,隧道顶底部土体刚度的巨大差异导致结构产生显著的不均匀弯曲与剪切变形,使得顶部环缝张开量与错台量沿着隧道纵向呈现出明显的波动性与不均匀性。

2) 环缝张开量与错台量随时间的演化具有同步与耦合特征。加载结束后,由于上部软弱土层较下部硬土层留存了更大的残余变形,隧道顶部的环缝张开量依然维持在较高水平,极大增加了接头防水失效的长期风险。

3) 管片混凝土受拉损伤受地层约束控制显著,主要集中在管片接头部位及拱顶区域。在上部较软土层约束较弱的条件下,拱顶区域因承受较大的弯曲挤压作用而出现明显的压碎损伤。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(2026CXXL140)。

参考文献

- [1] 李孝雄, 庄海洋, 赵荣华, 等. 软硬交互场地盾构隧道纵向地震反应动力子结构法[J]. 振动工程学报, 2025, 38(10): 2442-2451.
- [2] Zhuang, H.Y., Li, X.X., Zhao, K., *et al.* (2025) Liquefaction-Induced Lateral Spreading Characteristics of the Fluvial Terraces at the Lower Reaches of Yangtze River. *Engineering Geology*, **346**, Article ID: 107900. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107900>
- [3] Tsiniadis, G., de Silva, F., Anastasopoulos, I., Bilotta, E., Bobet, A., Hashash, Y.M.A., *et al.* (2020) Seismic Behaviour of Tunnels: From Experiments to Analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **99**, Article ID: 103334. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103334>
- [4] Yu, H.T., Chen, J.T., Yuan, Y. and Zhao, X. (2016) Seismic Damage of Mountain Tunnels during the 5.12 Wenchuan Earthquake. *Journal of Mountain Science*, **13**, 1958-1972. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-3878-6>
- [5] 余大鹏, 徐强, 赵顺磊, 等. 上软下硬地层盾构下穿引起既有隧道变形解析解及影响因素分析[J]. 城市轨道交通研究, 2026, 29(6): 131-138.
- [6] 张红彬, 王跃翔, 夏琴, 等. 盾构隧道穿越上软下硬地层地表变形数值模拟研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2026, 49(1): 127-132.
- [7] 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[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(5): 12-21.
- [8] 于辉, 赵国臣, 徐龙军, 等. 穿越上软下硬地层海底隧道衬砌横向地震响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(2): 211-218.
- [9] Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. (1973) Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **99**, 421-427. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001885>
- [10] 赵丁凤, 阮滨, 陈国兴, 等. 基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 888-895.
- [11] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and Oñate, E. (1989) A Plastic-Damage Model for Concrete. *International Journal of Solids and Structures*, **25**, 299-326. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- [12] 赵凯, 卢艺静, 王彦臻, 等. 海底盾构隧道结构端部效应及抗减震措施研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(16): 33-42.