

DOI: 10.11779/CJGE20220249

P 波入射下考虑基槽回填材料的沉管隧道抗震分析

李亚东^{1,2}, 周金雯^{1,2}, 单毅^{*1,2}, 崔杰^{1,2}, 魏立新³

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州大学工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广东 广州 510006;
3. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060)

摘要: 沉管隧道基槽回填是沉管隧道施工中的重要工序, 而其对沉管隧道的抗震减震性能影响规律在现有研究中鲜有提及。为探究沉管隧道柔性接头在不同回填材料刚度下的位移量, 基于多质点-弹簧-梁模型, 结合纵向反应位移法, 运用考虑纵向限位装置的柔性接头轴向受力分析模型, 以广州市如意坊沉管隧道为背景, 开展 P 波入射下的纵向动力响应分析数值试验。计算结果表明: 数值模型与计算方法能够得到合理的场地与结构响应; 采用纵向反应位移法进行计算分析时应提取自由场中隧道截面对应位置处的多点位移时程作为结构的激励; 未经处理的淤泥质软黏土不能作为基槽回填材料, 将砂土或砾石作为基槽回填材料时, 若增大其密实度, 其抗震能力可获得进一步提高。该研究结果可为沉管隧道在地震作用下的响应分析与抗震设计提供更为可靠完善的计算模型与设计依据。

关键词: 沉管隧道; 动力分析; 简化模型; 柔性接头; 回填材料

中图分类号: U452.28 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)06-1190-10

作者简介: 李亚东(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail: liyadong@gzhu.edu.cn。

Seismic response analysis of immersed tunnels considering backfill materials of foundation under incidence of P waves

LI Yadong^{1,2}, ZHOU Jinwen^{1,2}, SHAN Yi^{1,2}, CUI Jie^{1,2}, WEI Lixin³

(1. College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structural Safety, Ministry of Education, Guangzhou 510006, China; 3. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract: The backfilling of foundation groove of immersed tunnels is an important procedure in the construction, but the influence mechanism of its seismic performance is seldomly mentioned in the previous researches. In order to investigate the influences of the stiffness of backfill materials on the deformation of flexible joints in the immersed tunnels, the numerical tests of longitudinal dynamic response analysis under incidence of P waves are carried out for Ruyifang immersed tunnel in Guangzhou by using the particle-spring-beam model with implementation of the longitudinal displacement method and the flexible joint model with the longitudinal limit devices. The results show that the numerical model and method can make the structures respond in a timely and reasonable manner. When the longitudinal response displacement method is used for calculation and analysis, the time histories of multi-point displacement in the free field should be extracted as the excitation of the structures. The untreated soft silt clay cannot be used as the backfill materials. If the density of sand or gravel is increased, the seismic capacity will be further improved. The research results may provide a more reliable model and design basis for the response analysis and seismic design of immersed tunnels under earthquakes.

Key words: immersed tunnel; dynamic analysis; simplified model; flexible joint; backfill material

0 引言

与其他隧道施工工艺^[1]不同, 沉管隧道常埋置于河、海床浅层由预制管节沉放拼接而成, 除要求管节具有良好的密封性外, 在管段沉放前, 须挖除河床、海床表层的大量软弱淤泥质土。先铺法需在管节沉放前铺设基础, 后铺法需在管节沉放就位后压入相应基础层材料。Grantz^[2]总结其 40 a 从业经验后也指出沉

管隧道地基基础必须满足上部承载力及动荷载等级要求, 特别是地震荷载。同时两种工况均需在基础处理完成后, 于管节周围回填砾石等固定防护层, 以保证

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3003601); 国家自然科学基金(52020105002, 51991393); 广州市校(院)联合资助项目基础与应用基础研究(202201020155)

收稿日期: 2022-03-08

*通信作者(E-mail: yshan@gzhu.edu.cn)

管节稳定性。

目前, 国内外已建成的沉管隧道近百余座, 对此已有大量专家学者对隧道结构自身抗震性能做出深入研究。Ouyang 等^[3]制作了柔性和刚性两种隧道模型, 根据振动台试验结果得出隧道自身刚度越小越容易适应土体变形等结论。Yu 等^[4]认为管节接头是沉管隧道结构的薄弱环节, 针对其受力特性设计了一种接头减震装置, 同时开展了大比尺模型试验验证其有效性。Li 等^[5]研制了用于加大接头处混凝土剪力键耗能与延性的混合纤维增强混凝土, 并建立了剪力键极限承载力的回归分析模型。但另一方面, 探究地震荷载下隧道结构所处环境, 特别是考虑回填材料对沉管隧道抗震性能影响的研究较为稀缺。

沉管隧道抗震性能分析主要有模型试验和数值计算两种方法。Cheng 等^[6]基于振动台试验研究了地震作用下土层特性和上覆水对沉管隧道及其所在场地的影响, 定性分析了管节的响应情况, 并指出接头是沉管隧道抗震设计的重要组成部分。Yu 等^[7]设计了多点振动台试验, 得出了在非一致地震动激励作用下, 沉管隧道接头张开量比一致激励工况下更大等结论。Wang 等^[8]采用水-土-隧道试验模型进行单自由度振动台试验, 总结了动荷载下液体对沉管隧道的作用情况。尽管模型试验结果较为真实可信但其所需的费用昂贵且很难进行大规模批量对比试验。因此, 沉管隧道抗震性能影响性分析主要还是借助动力有限元方法。赵密等^[9]基于近场波动有限元方法并结合黏弹性人工边界条件, 探讨了P波作用下3D跨断层隧道轴线处地震响应情况。Ding 等^[10]以上海外环沉管隧道为背景, 建立三维动力非线性有限元分析模型, 揭示了地震作用下沉管隧道的动力响应特点及其易损部位, 但该模型节点数与单元数量均超百万, 非一般计算机能实现。由此可见地下长线型结构的动力简化分析数值试验才是指导地下结构工程抗震设计的主要途径之一^[11-12]。现有的沉管隧道简化模型中, 对柔性接头的模拟大都集中于GINA止水带受力压缩的情况^[13-14], 未发现结合纵向限位装置进行分析的例子。同时, 柔性接头的受力分析大多只考虑其受压状态, 而实际工程中接头受拉状态下纵向限位装置的影响也是管节张开量的关键因数之一, 基于此提出了考虑纵向限位装置的沉管隧道柔性接头模型。

本文依托实际工程, 综合多质点-梁-弹簧模型与纵向反应位移法, 利用ABAQUS有限元软件建立沉管隧道抗震简化分析多尺度模型, 开展以广州市如意坊沉管隧道为背景的P波纵向动力响应分析数值试验, 通过改变基槽回填材料基本特性的形式探究回填

材料包裹下的沉管隧道动力响应情况, 所得结果可指导沉管隧道抗震分析。

1 简化模型与分析方法

1.1 多质点-梁-弹簧模型

Okamoto 等^[15]与川島一彦^[16]在对沉管隧道进行多次地震观测并开展大规模振动台试验后, 首次提出针对沉管隧道地震响应分析的质点-弹簧简化模型, 并成功应用于日本东京港沉管隧道抗震分析中。该模型采用单质点和弹簧变形量代替场地所有土层质量与变形情况, 可见其不易反映出场地沿深度的分布特性对结构响应的影响。纵向反应位移法作为地下长线型结构的主要分析方法之一, 将地下结构地震分析过程拆解为自由场动力时程分析和结构响应分析两部分。自由场动力时程分析可突出场地特性, 能够较为准确地反应场地在地震作用下的响应情况, 根据这一思路, 提出结合纵向反应位移法与多质点-梁-弹簧模型进行沉管隧道纵向地震响应分析的改进多质点-梁-弹簧模型, 模型中, 土质点代表包裹沉管隧道的单一回填材料。

传统纵向反应位移法提取隧道轴线所在位置处的位移时程作为结构部分的激励, 但由于沉管隧道截面尺寸大, 其截面可能跨越多个土层, 势必出现不可忽视的相对位移。同时, 隧道结构周围的回填材料并不相同, 多数情况下隧道上部覆有抛石防护层, 下部铺设碎石垫层或砂基础, 侧面回填基槽则是填充锁定回填碎石。为解决隧道截面出现的相对位移过大与包裹层材料不同等问题, 在隧道结构上下左右共布置四个单质点。拟提取自由场地震分析中抛石层顶面、隧道轴线与垫层底面3个位置处的位移时程作为结构的地震动激励, 分别施加于结构模型的上、中、下控制点, 见图1。其中中部控制点位于沉管隧道的左右两侧, 输入自由场分析中隧道轴线处的位移时程。该地震动施加方案已成功运用于盾构隧道^[17]。

图1为自由场结合多质点-弹簧-梁模型, 图中黑色实心点为代表土体的集中质量点。图1(a)为二维自由场分析模型简图, 图1(b)为结构计算模型横截面图, 图1(c)为结构计算模型纵断面图, 其中介质弹簧 k_1 两端连接土质点与位移时程输入点, 相互作用弹簧 k_2 反应土结相互作用; 连接弹簧 k_3 用于传递土质点之间的内力。介质弹簧 k_1 与连接弹簧 k_3 刚度系数与土质点质量由土体性质决定, 已有多位学者给出具体计算方案并进行验证^[18], 相互作用弹簧 k_2 刚度计算参考《地下结构抗震设计标准》^[19]。

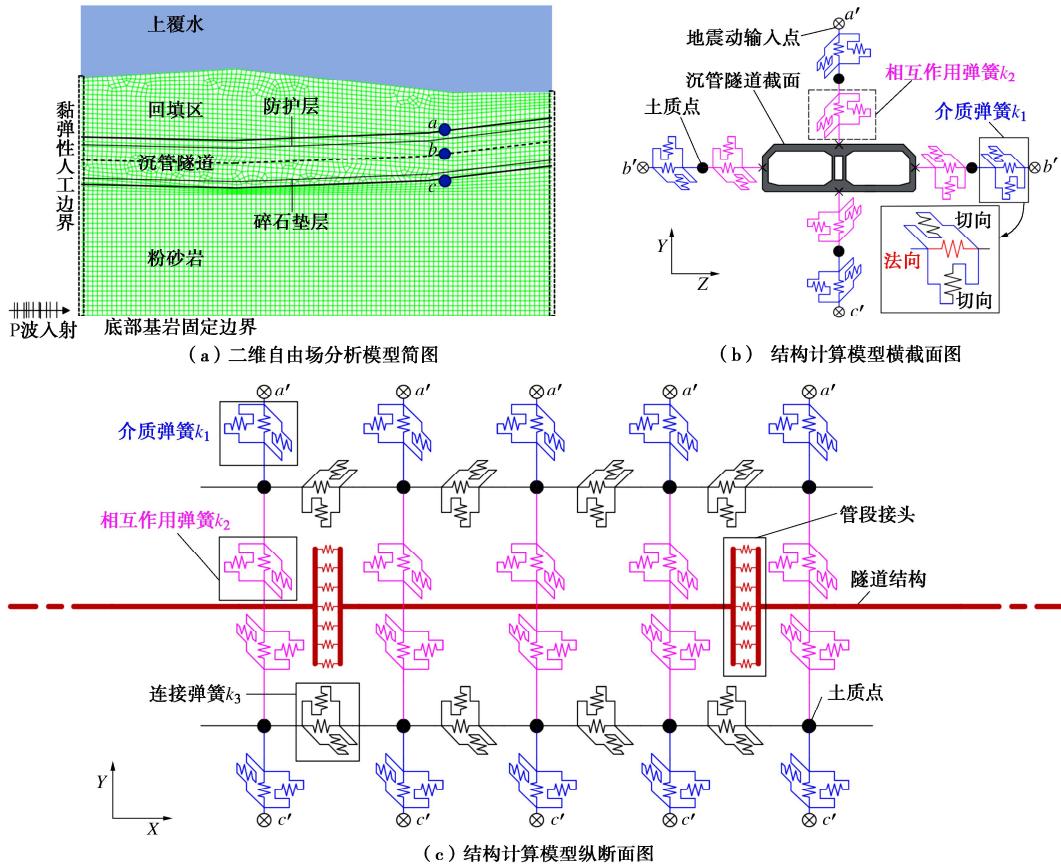


图 1 自由场结合多质点-弹簧-梁模型

Fig. 1 Free field combined with multi-particle-spring-beam model

1.2 柔性接头模型

沉管隧道柔性接头主要部件包括 GINA 止水带、 Ω 止水带、预应力钢拉索、水平及竖向剪力键，为更好地反应各部件的力学特性，通过定义非线性弹簧荷载变形曲线的方法实现对管节接头的模拟。图 2 为沉管隧道接头模型示意图。

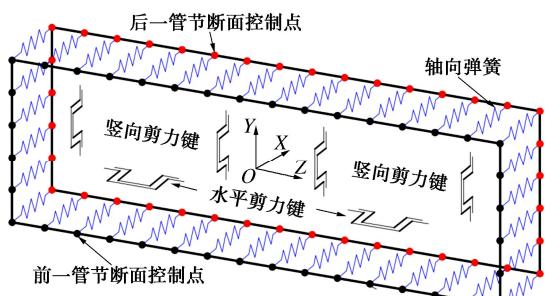


图 2 接头模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of joint model

柔性接头（图 3）是沉管隧道中保持管节良好密封性的主要构造。沉管隧道管节沉放与连接过程大致为：沉放管段，通过水力压接将 GINA 止水带压缩到预定位置以保证其止水性能，而后进行预应力拉索的装配。水力压接后的 GINA 止水带处于压缩状态，进入运营阶段的止水带受到压力作用时，将不再由起始

点开始变形，而是在已压缩的基础上发生位移，即要使其发生变形要施加更大的压力。

纵向限位装置预应力拉索可以帮助柔性接头抵抗更大的弯矩与拉力。在以往的接头模型中，将预应力拉索纳入考虑范围的情况较少，这可能低估了接头的密水性。故在此提出考虑纵向限位装置的柔性接头轴向受力分析模型。由于 Ω 止水带受力与其他部件相差较大，故对其不作考虑。定义纵向限位装置的本构关系为双折线弹塑性，其刚度取值由接头设计参数决定。

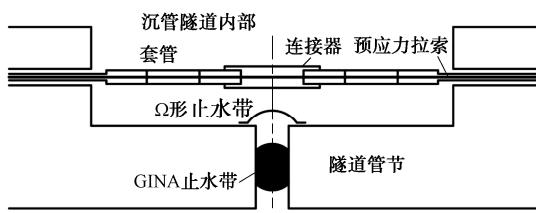


图 3 柔性管节接头构造

Fig. 3 Structure of flexible joint

以型号为 G 150-125-60 的 GINA 止水带为例，记常水位下，沉管隧道的 GINA 止水带初始平均压缩量为 x_p ，则可根据 GINA 止水带受力压缩曲线得到水力压接后 GINA 止水带单位长度所受压力为 F_p 。耦合 GINA 止水带后半段压缩曲线与钢绞线本构关系得到

考虑纵向限位装置的柔性接头轴向受力计算公式:

$$F = \begin{cases} -14e^{-0.05(x-x_p)} + F_p & (x < 0) \\ k_{s1} \cdot x & (0 \leq x \leq x_1) \\ k_{s2} \cdot (x - x_1) + F_{x1} & (x_1 < x) \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为接头所受轴力(kN); x 为接头位移量(mm); k_{s1} , k_{s2} 分别为钢绞线弹性段刚度与塑性段刚度; x_p 为水力压接后GINA止水带压缩量(mm); F_p 为水力压接后单位长度GINA止水带所受压力(kN); x_1 为钢绞线屈服位移; F_{x1} 为屈服强度值。

GINA止水带和预应力拉索限制了接头的轴向位移,而剪力键则主要承受地震和地基不均匀沉降所产生的断面剪力。本文采用陈国兴等^[12]给出的水平向混凝土剪力键与竖向钢剪力键受力分析模型,见图4。

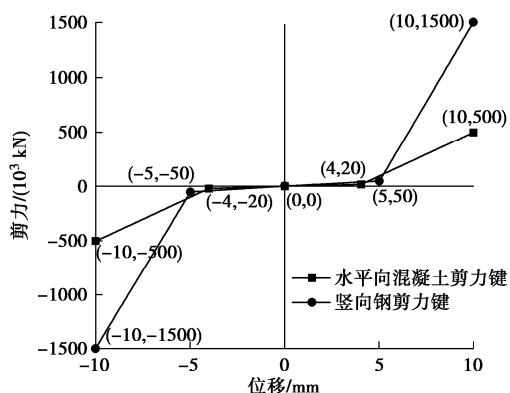


图4 单个剪力键受力分析模型

Fig. 4 Stress analysis model for single shear key

2 数值试验模型与计算

以广州市如意坊沉管隧道为背景,应用ABAQUS有限元软件对该工程项目开展平面P波在行波效应下水平入射的非一致激励抗震分析。

2.1 自由场计算数值模型

(1) 场地划分情况

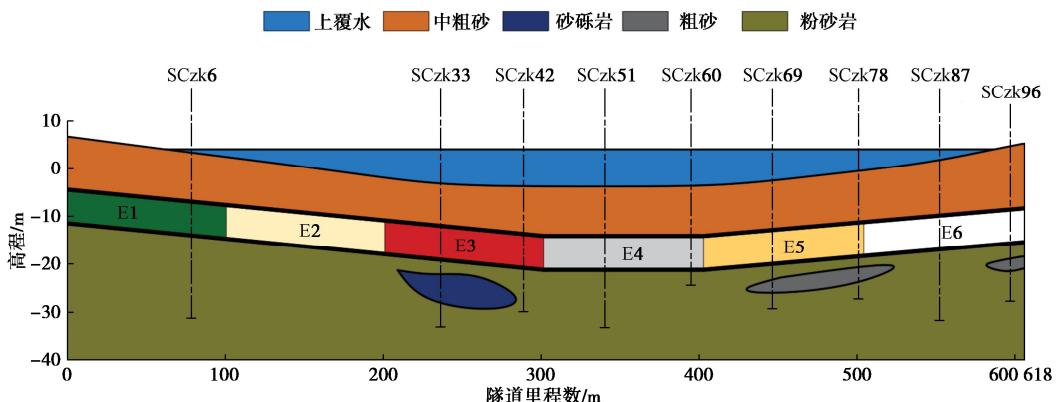


图5 基槽开挖回填后场地土层分布概况

Fig. 5 Distribution of site soils after excavation and backfilling of foundation groove

目前常用的反应位移法认为地下长线型结构位移完全服从于土体变形,陈红娟等^[20]开展了沉管隧道-接头-场地土振动台试验,证实了这一特性也适用于沉管隧道。在以往的自由场数值模型中,地层划分常以隧道结构施工前的场地土层分布为依据,该方法适用于施工后周围土体或岩体类型不变的隧道施工方法,如盾构法。沉管隧道在施工初期需进行基槽开挖,待管节沉放完毕再选取合适的回填材料进行回填,故在进行沉管隧道自由场土层划分时应以基础回填后场地土层情况为准。该工程基槽回填后土体分布情况见图5。场地全长618 m,上覆水以静荷载的形式施加于土体顶面,将上部淤泥土挖除以中粗砂回填后,土体分层较为明显,且岩体埋藏深度较浅,场地相对稳定。

如意坊沉管隧道两端存在暗埋段,在自由场两侧各延伸100 m以体现暗埋段的影响。同时,在两侧边界处设置黏弹性人工边界^[21-22]。场地单元网格划分尺寸为1 m,满足最大网格尺寸为输入波长1/10~1/8的要求^[23]。

(2) 地震波选取与输入

依据工程场地地震安全性评价报告,选取设防烈度下50 a超越概率为10%的人工地震动,另选取El-Centro地震波作为输入地震动。中国地震动参数区划图(GB18306—2015)中给出广州地区地震设防峰值加速度为0.1g,故将El-Centro地震波峰值加速度调整为0.1g,二者加速度时程与傅里叶谱见图6,二者传播方向均与隧道轴线平行。

Tso等^[24]基于PGA/PGV(峰值加速度/峰值速度)将地震动分为三类,其中PGA/PGV>1.2为高频波,0.8<PGA/PGV<1.2为中频波,PGA/PGV<0.8则为低频波。据此,可将安评波与El-Centro波划分为低频波与中频波详见表1。

自由场侧面边界为黏弹性人工边界,须将地震动转化为等效节点荷载的形式进行输入;底部基岩处由

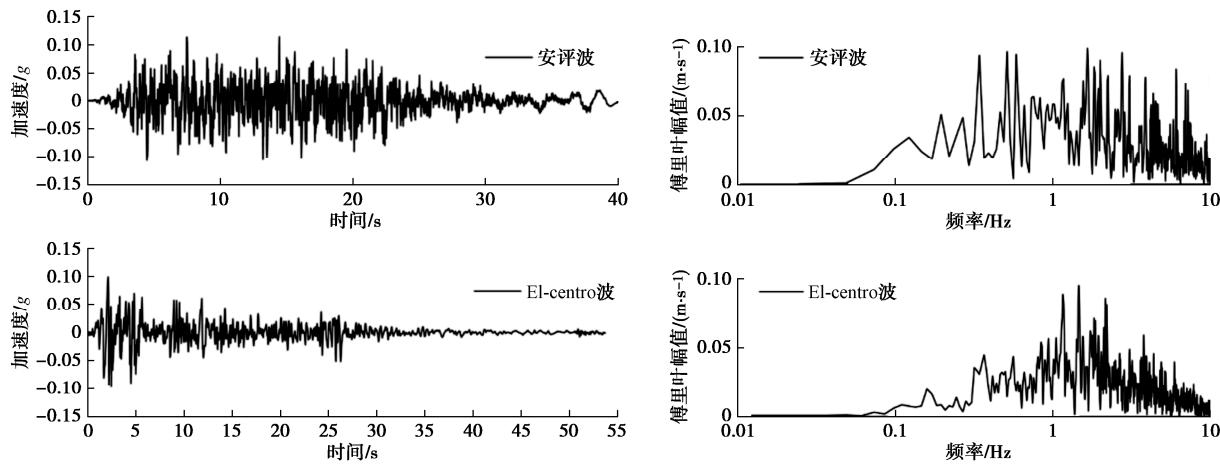


图 6 输入地震动幅值曲线与傅里叶谱

Fig. 6 Amplitude curves and Fourier spectrum of input ground motion

于剪切模量较大设置为固定边界，底部地震动以位移的形式进行输入。考虑行波效应的时滞所需进行的地震波处理步骤为：①确定视波速；②根据网格尺寸确定计算步长；③对地震波进行线性插值处理；④计算各点起振时刻；⑤根据起振时刻制作地震动幅值曲线；⑥施加边界处各点地震动。

取基岩处剪切波速 560 m/s 进行计算得到压缩波波速约为 1047 m/s，朱赛男等^[25]对平面 P 波入射下海底衬砌隧道求解析解，得到场地水平位移随入射角增加而增加的结论。考虑 P 波沿隧道轴向入射的情况，最终选定视波速为 1000 m/s，根据网格间距得到时间步长为 0.001 s。以距模型起点 100 m 处为例，计算得到模型起振时刻为 0.1 s，则将地震动幅值曲线调整为从 0.1 s 开始，以此类推。

表 1 地震动分类

Table 1 Classification of ground motion

| 地震动 | PGA/g | PGV/ (m·s ⁻¹) | PGA/PGV/ (g·(m·s) ⁻¹) | 分类 |
|-------------|--------|------------------------------|--------------------------------------|-----|
| 安评波 | 0.1145 | 0.1477 | 0.7754 | 低频波 |
| El-Centro 波 | 0.1000 | 0.1042 | 0.9598 | 中频波 |

(3) 土体动力本构模型

自由场动力分析中土体动力本构采用黏弹性 Kelvin 模型^[26]。该模型为等效线性黏弹性模型其能够较好地反应土体的实际性能。应用 MATLAB 软件编写程序实现等效线性黏弹性模型的自动迭代。Kelvin 模型由线弹性弹簧与阻尼元件并联而成，其应力应变关系为

$$\sigma = \alpha \varepsilon + \beta \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

式中： α ， β 分别为模量系数与黏滞系数； σ ， ε 为应力与应变。

文中砂土^[27]与基岩^[28]采用的模量衰减曲线与阻尼比曲线见图 7。土层计算参数见表 2。在该模型的计算过程中，需定义土体等价应变幅值，其值可取为整

个动力作用过程中最大应变幅值与折减系数的乘积，对于地震过程，折减系数通常取为 0.65^[29]。

初始动剪切模量 G_{\max} 可由场地剪切波速根据公式计算得到

$$G_{\max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (3)$$

式中： ρ 为土体密度； V_s 为剪切波速^[30]。

定义初始模量衰减系数为 1，阻尼比为 0，取收敛级数为 10^{-3} 。安评地震波最终迭代次数为 4 次，El-Centro 波为 7 次，最大剪应变对应剪切模量衰减值出现在砂土区域。

表 2 土层参数

Table 2 Parameters of soil layers

| 土体类型 | 剪切波速/ (m·s ⁻¹) | 深度 /m | 密度/ (kg·m ⁻³) | 泊松比 |
|------------|-------------------------------|----------|------------------------------|------|
| 中粗砂 | 180 | 0-3.5 | 1600 | 0.2 |
| | 200 | 3.5-8.25 | 1600 | 0.2 |
| | 220 | 8.25-13 | 1600 | 0.2 |
| | 230 | 13-15 | 1600 | 0.2 |
| 粗砂 | 250 | 16-20 | 1500 | 0.25 |
| | 240 | 13-18 | 1500 | 0.25 |
| 中风化砂 砾岩 | 400 | 20-25 | 2200 | 0.35 |
| | 380 | 15-21 | 2400 | 0.3 |
| | 410 | 21-26 | 2400 | 0.3 |
| | 440 | 26-31 | 2400 | 0.3 |
| | 470 | 31-36 | 2400 | 0.3 |
| | 500 | 36-41 | 2400 | 0.3 |
| | 530 | 41-46 | 2400 | 0.3 |
| | 560 | 46-51 | 2400 | 0.3 |

2.2 考虑回填材料作用的结构计算模型

结构有限元模型如图 8 所示，隧道全长 618 m，其中每段管节长 103 m，共设有 5 个柔性接头。除 E4 外，其余管节均带有一定斜度（1 : 51.5）。以三维梁单元模拟由 C40 混凝土浇筑而成的隧道管节，密度、弹性模量、泊松比与阻尼比分别为 2600 kg/m³，32.5

GPa, 0.2 与 5%^[31], 阻尼比以瑞利阻尼的形式输入^[32]。由于在自由场计算中, 已考虑土体阻尼对地震动能量的耗散, 故在结构计算模型中不再重复考虑基槽回填材料阻尼值。回填材料质量集中于单质点, 质点间距与梁单元尺寸均为 1 m。

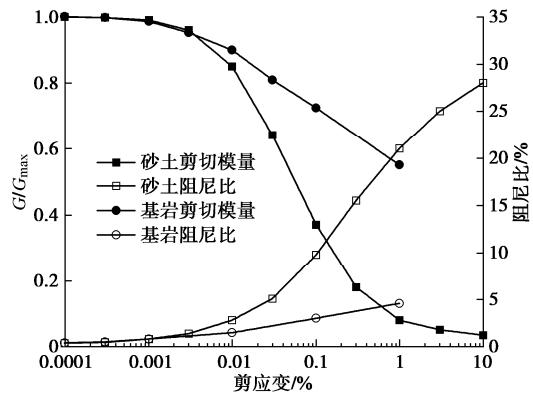


图 7 砂土与基岩模量衰减曲线与阻尼比曲线

Fig. 7 Curves of modulus attenuation and damping ratio of sand and bedrock

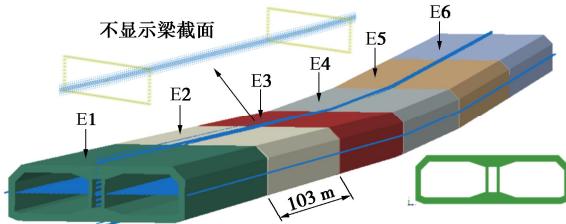


图 8 结构有限元模型

Fig. 8 Finite element model for structures

在该过江隧道工程中，管节下部铺设碎石基础和砂垫层，上部盖有抛石防护层，左右基槽为锁定回填砾石与一般回填料(中粗砂)，详细分布情况见图9。回填材料各项基本参数与弹簧参数取值见表3。与管节上下面直接接触的材料为砂垫层，因此，上下管节相互作用弹簧刚度系数由中粗砂确定。如意坊沉管隧

道接头设置有 2 组水平向混凝土剪力键和 4 组纵向钢剪力键，纵向限位装置由 12 条直径为 15.2 mm 的高强低松弛钢绞线编制而成，整个截面共布置有 40 个纵向限位装置，其参数取值参考邢心魁等^[33]对钢绞线进行动态力学拉伸试验得到的应力应变关系。

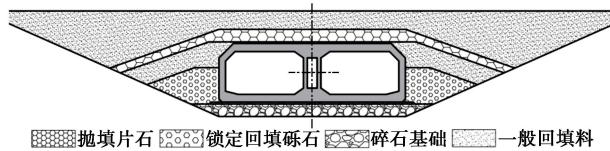


图9 沉管隧道回填材料包裹情况

3 沉管隧道地震响应分析

3.1 沉管隧道结构响应

以如意坊沉管隧道为研究背景，评估地震作用下管节受力情况与接头变形情况。

管节峰值轴力和弯矩是隧道结构设计与受力分析所考虑的关键参数。将峰值轴力与峰值弯矩沿隧道轴向的分布情况绘于图 10 中,两种地震动输入下管节峰值轴力沿隧道里程数变化均呈明显的波浪形,结合隧道管节排布情况,其分布特性大致表现出由中部向两端递减的趋势,这是接头处刚度较管节处小所致。整体上看,安评波与 El-Centro 波引起的隧道峰值轴力分布情况较为接近,最大轴力分别为 2.04×10^8 , 2.07×10^8 N。

如意坊沉管隧道除 E4 外其余管段都带有一定坡度，使得隧道整体呈钳状，故最大弯矩位于隧道中段。地震作用下，峰值弯矩在 E1, E2 段分布较为稳定，在 E3, E4, E5, E6 段波动较大，为后半段场地土层较不均匀引起。

表3 回填材料各项基本参数

Table 3 Basic parameters of backfill materials

| 回填材料 | 基本参数 | | 土质点质量/ $10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ | 介质弹簧 $k_1/$ $(10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1})$ | | 相互作用弹簧 $k_2/$ $(10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1})$ | | 连接弹簧 $k_3/$ $(10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1})$ | | |
|--------|---|--|--|---|--------|---|------|---|---------|----------|
| | 剪切波速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | | 泊松比 | kg | 切向 | 法向 | 切向 | 法向 | |
| 抛石防护层 | 500 | 2500 | 0.20 | 91477 | 2605.8 | 10423.4 | 15.4 | 46.1 | 37500.0 | 90000.0 |
| 碎石基础 | 350 | 2300 | 0.23 | 84159 | 1204.1 | 5485.3 | 15.4 | 46.1 | 16905.0 | 41586.3 |
| 锁定回填砾石 | 300 | 2200 | 0.25 | 94615 | 70.7 | 353.6 | 47.5 | 142.6 | 22176.0 | 55440.0 |
| 中粗砂 | 200 | 1600 | 0.30 | 68255 | 18.2 | 118.3 | 15.4 | 46.1 | 7168.0 | 18636.8 |
| 淤泥质黏土 | 100 | 1500 | 0.40 | 62789 | 4.6 | 64.7 | 3.6 | 10.8 | 1680.0 | 4704.0 |
| 较密砂土 | 250 | 1850 | 0.30 | 78920 | 32.9 | 213.7 | 27.8 | 83.3 | 12950.0 | 33670.0 |
| 中密砾石 | 350 | 2300 | 0.25 | 98915 | 77.2 | 385.9 | 67.6 | 202.9 | 31556.0 | 78890.0 |
| 较密砾石 | 400 | 2450 | 0.20 | 106146 | 103.6 | 414.6 | 94.1 | 282.2 | 43904.0 | 105369.6 |

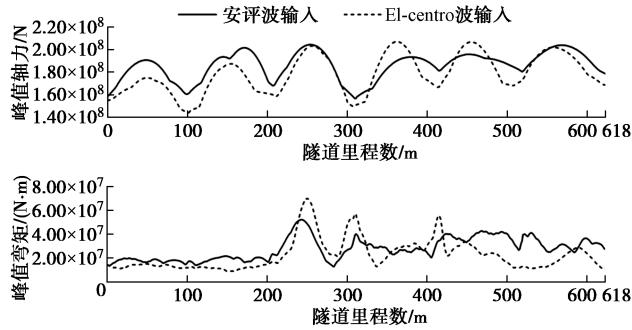


图 10 峰值轴力与弯矩沿隧道轴线分布情况

Fig. 10 Distribution of peak axial force and bending moment along tunnel axis

图 11 为隧道结构起点 (1 m) 与终点 (618 m) 的位移响应曲线, 从图中可以观察到明显的时滞现象。与自由场位移时程曲线进行对比, 二者响应曲线相近, 为进一步分析, 选取里程 400 m 处 (土层最大相对位移里程处) 安评波输入下自由场对应的结构各输入点与结构处位移时程曲线进行比较, 如图 12 所示。图中结构处位移时程曲线与输入点激励较为接近, 即隧道结构能够对输入地震动做出合理响应, 且符合反应位移法中结构位移服从周围土体变形的假定。同时, 计算得到防护层顶 *a* 点与碎石基础底 *c* 点间最大相对位移达到该处土层最大相对位移的 80%, 这说明提取自由场中沉管隧道截面多点位移时程作为隧道结构的激励是很有必要的。

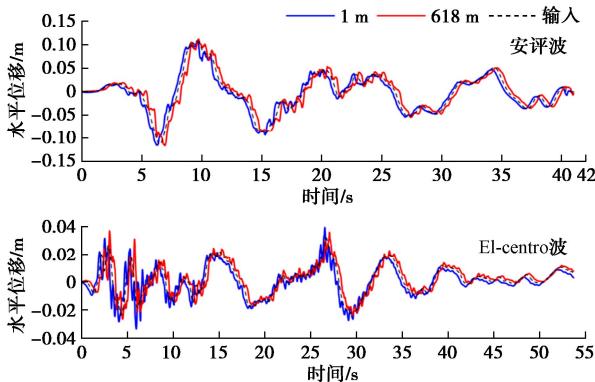


图 11 结构响应位移时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of response displacement of structures

接头张开量一直是沉管隧道动力分析关注的重点。将隧道各接头张合量绘于图 13, 可以看出除 E6-AM 接头外, 安评波输入下的接头张合量均大于 El-Centro 波输入情况。由于该项目尚未完工, 无法得到最不利 GINA 止水带的初始压缩量。但在常水位下, GINA 止水带压缩量在 7~8 cm 范围浮动, 为客观合理的分析其在地震过程中的张合量, 取中间值 7.5 cm 作为初始压缩量进行计算。该工程的水密性要求限值为最小压缩量 4.5 cm 与最大压缩量 10 cm, 即在水力压接后的接头张开量限值为 3 cm, 压缩量限值为 2.5

cm。结果显示, 在 P 波水平入射情况下 (峰值加速度为 0.1g), 接头张合量均满足要求, 即仍可以保证管节的密封性。接头张合量呈现沿隧道里程数增大而减小的趋势, 这是由于行波效应下, 先接触到地震动的接头以力转化为变形的形式进行能量的释放, 导致后续接头张合量逐步减小。

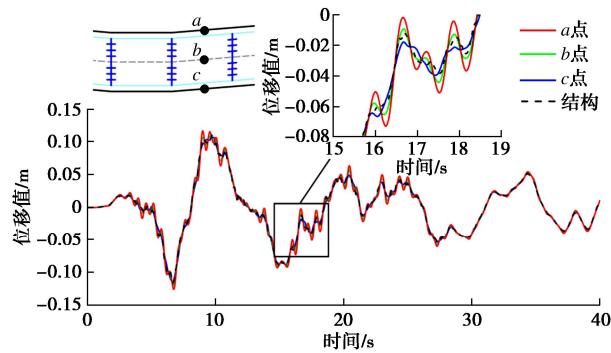


图 12 各输入点与结构处响应时程曲线

Fig. 12 Time-history curves of response at each input point and structures

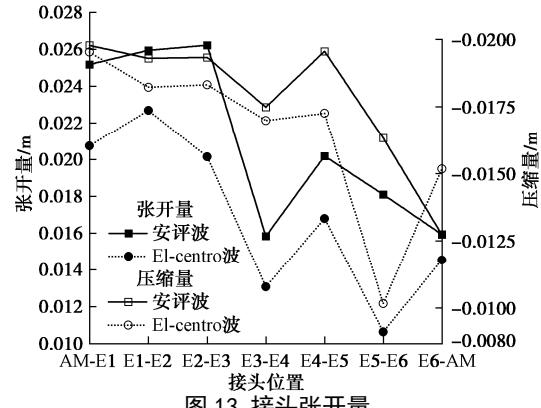


图 13 接头张开量

Fig. 13 Tensions of joints

3.2 回填材料对隧道地震响应影响

增加假设的淤泥质软黏土与中粗砂作为锁定回填砾石的对照组。各项参数见表 3。以安评波作为输入地震波, 计算得到的接头张合量情况见图 14。

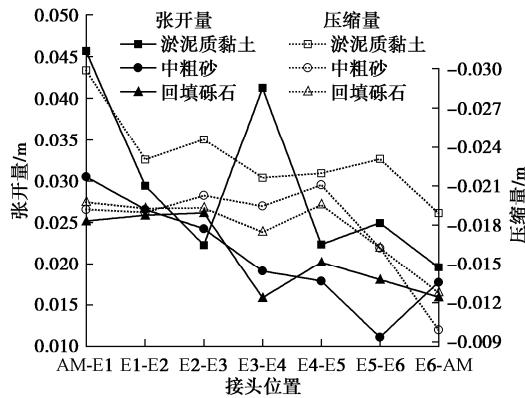


图 14 不同回填材料包裹下的沉管隧道接头张合量

Fig. 14 Tensions of joints of immersed tunnels wrapped with different backfill materials

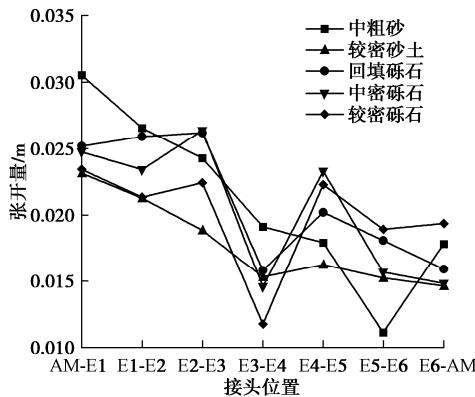


图 15 不同回填密实度材料下各接头张开量

Fig. 15 Openings of joints under different backfill compactnesses

采用淤泥质软黏土回填的沉管隧道在安评地震作用下的接头张开量最大值达到了 4.57 cm, 压缩量最大值达到 3.02 cm。在中粗砂与回填砾石工况下对应的最大张开量与压缩量仅为 3.11, 2.02 cm。当基槽回填强度低、不稳定材料时, 接头张合量将显著增大。因此, 基槽回填材料选择中粗砂与回填砾石较为合适。采用砾石与中粗砂作为回填材料时, 接头张合量基本满足限值要求, 为进一步探究回填材料密实情况对沉管隧道抗震性能的影响, 加设较密砂土、中密砾石与较密砾石 3 种工况。图 15 给出了不同回填密实度下各接头的张开量, 相同材料有着大致相同的变化趋势, 而同种材料的回填密实程度越高接头张开量越小。

结构局部出现的最大轴力与弯矩往往能够决定其是否开裂甚至破坏。图 16 显示, 当回填材料采用未经处理的淤泥时, 隧道结构的最大轴力将比其他工况大 9%~30%, 最大弯矩则大 40%~70%。其余回填材料对最大弯矩的影响较为稳定, 当回填材料为砂土时, 隧道结构受到的最大轴力值较小, 不易出现局部的开裂渗水情况。

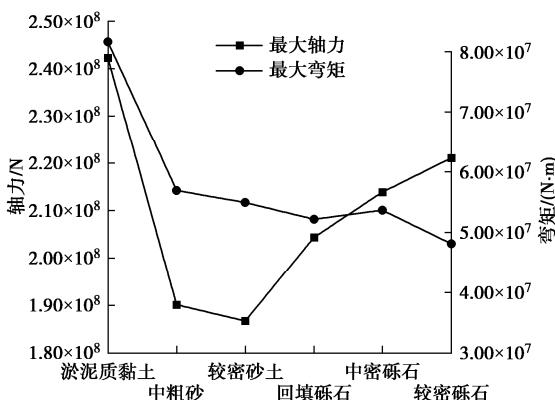


图 16 各种回填材料下最大轴力与弯矩比较

Fig. 16 Comparison of maximum axial forces and bending moments under various backfill materials

4 结 论

结合多质点-弹簧-梁模型与纵向反应位移法, 对广州市如意坊沉管隧道开展 P 波入射下的地震响应分析数值试验。分别建立了自由场计算模型和三维结构模型, 通过改变基槽回填材料基本性质的形式探究了回填材料包裹下的沉管隧道动力响应情况。同时, 根据柔性接头自身结构特点, 提出考虑纵向限位装置的柔性接头轴向受力分析模型。得到 3 点结论。

(1) 文中的数值模型与计算方法能够得到合理的场地与地震响应情况, 并可准确地将地震动从自由场过渡到隧道结构, 能够获得隧道结构出现内力分布不均与接头过度张拉等结果。

(2) 自由场计算结果显示隧道截面处相对位移达到土层整体相对位移的 80%以上, 因此进行纵向反应位移法的计算时, 应提取自由场中隧道截面对应位置处的多点位移时程作为结构的激励。

(3) 为避免在地震作用下接头出现渗漏, 未经处理的淤泥质软黏土不得作为回填料使用。采用砂土或砾石作为回填材料时, 沉管隧道抗震能力还算可观, 倘若增大二者的密实度, 则抗震能力将有所提高。

参 考 文 献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述・2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65. (Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's tunnel engineering research: 2015[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5): 1-65. (in Chinese))
- [2] GRANTZ W C. Steel-shell immersed tunnels—forty years of experience[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1997, 12(1): 23-31.
- [3] OUYANG Z Y, LI P J, CUI J, et al. Shaking table test study on flexible and rigid immersed tube tunnel in liquefiable soil layer[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 32(3): 78-91.
- [4] YU H T, XIAO W H, YUAN Y, et al. Seismic mitigation for immersion joints: design and validation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 67: 39-51.
- [5] LI Z X, LI C H, YAN J B. Seismic behaviour of hybrid-fibre reinforced concrete shear keys in immersed tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 88: 16-28.
- [6] CHENG X J, JING L P, CUI J, et al. Shaking-table tests for immersed tunnels at different sites[J]. Shock and Vibration,

- 2017: 1-11.
- [7] YU H T, YUAN Y, XU G P, et al. Multi-point shaking table test for long tunnels subjected to non-uniform seismic loadings: part II application to the HZM immersed tunnel[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **108**: 187-195.
- [8] WANG Z Z, JIANG L, GAO Y. Shaking table test of seismic response of immersed tunnels under effect of water[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, **116**: 436-445.
- [9] 赵密, 欧阳文龙, 黄景琦, 等. P 波作用下跨断层隧道轴线地震响应分析[J]. 岩土力学, 2019, **40**(9): 3645-3655. (ZHAO Mi, OUYANG Wenlong, HUANG Jingqi, et al. Seismic response analysis of cross-fault tunnel axis under p wave[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(9): 3645-3655. (in Chinese))
- [10] DING J H, JIN X L, GUO Y Z, et al. Numerical simulation for large-scale seismic response analysis of immersed tunnel[J]. Engineering Structures, 2006, **28**(10): 1367-1377.
- [11] 许紫刚, 许成顺, 杜修力, 等. 基于拟静力推覆分析的大开车站和区间隧道地震损伤研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(7): 1182-1191, 1373. (XU Zigang, XU Chengshun, DU Xiuli, et al. Seismic damage of Daikai Station and tunnel based on quasi-static pushover analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(7): 1182-1191, 1373. (in Chinese))
- [12] 陈国兴, 孙瑞瑞, 赵丁凤, 等. 海底盾构隧道纵向地震反应特征的子模型分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(11): 1983-1991. (CHEN Guoxing, SUN Ruirui, ZHAO Dingfeng, et al. Longitudinal seismic response characteristics of seabed shield tunnels using submodeling analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(11): 1983-1991. (in Chinese))
- [13] ANASTASOPOULOS I, GEROLYMOS N, DROSOS V, et al. Behaviour of deep immersed tunnel under combined normal fault rupture deformation and subsequent seismic shaking[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, **6**(2): 213-239.
- [14] CHEN Z Y, LIANG S B, HE C. Seismic performance of an immersed tunnel considering random soil properties and wave passage effects[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, **14**(1): 89-103.
- [15] OKAMOTO S, TAMURA C. Behaviour of subaqueous tunnels during earthquakes[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1972, **1**(3): 253-266.
- [16] 川島一彦. 地下構造物の耐震設計[M]. 日本: 鹿島出版会, 1994. (KAWAJIMA K. Aseismic Design of Underground Structure[M]. Kajima: Kajima Institute Publishing Co. Ltd., 1994. (in Japanese))
- [17] MIAO Y, YAO E L, RUAN B, et al. Seismic response of shield tunnel subjected to spatially varying earthquake ground motions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **77**: 216-226
- [18] 禹海涛, 宋毅, 李亚东, 等. 沉管隧道多尺度方法与地震响应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, **49**(6): 807-815. (YU Haitao, SONG Yi, LI Yadong, et al. Multi-scale method and seismic response analysis of immersed tunnel[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, **49**(6): 807-815. (in Chinese))
- [19] 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: 26-33. (Standard for Seismic Design of Underground Structures: GB/T 51336—2018 [S]. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 2018: 26-33. (in Chinese))
- [20] 陈红娟, 闫维明, 陈适才, 等. 沉管隧道-接头-场地土振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(4): 634-644. (CHEN Hongjuan, YAN Weiming, CHEN Shicai, et al. Shaking table tests on immersed tunnel-joint-soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(4): 634-644. (in Chinese))
- [21] 陈誉升, 丁祖德, 资昊, 等. 考虑空洞影响的盾构隧道地震易损性分析[J]. 岩土力学, 2021, **42**(12): 3385-3396. (CHEN Yusheng, DING Zude, ZI Hao, et al. Seismic vulnerability analysis of shield tunnels considering cavitation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(12): 3385-3396. (in Chinese))
- [22] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在 ABAQUS 中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(7): 1445-1457. (MA Shengjie, CHI Mingjie, CHEN Hongjuan, et al. Implementation of viscoelastic artificial boundary in ABAQUS and comparative study of ground motion input methods[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(7): 1445-1457. (in Chinese))
- [23] KUHLEMAYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, **99**(5): 421-427.
- [24] TSO W K, ZHU T J, HEIDEBRECHT A C. Engineering implication of ground motion A/V ratio[J]. Soil Dynamics

- and Earthquake Engineering, 1992, **11**(3): 133-144.
- [25] 朱赛男, 李伟华, LEE V W, 等. 平面P波入射下海底衬砌隧道地震响应解析分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(8): 1418-1427. (ZHU Sainan, LI Weihua, LEE V W, et al. Seismic response of undersea lining tunnels under incident plane P waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(8): 1418-1427. (in Chinese))
- [26] 费康, 刘汉龙. ABAQUS的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 881-890. (FEI Kang, LIU Hanlong. Secondary development of ABAQUS and its application to static and dynamic analyses of earth-rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 881-890. (in Chinese))
- [27] SUN J I, GOLESORKHI R, SEED H B. Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils[R]. Berkeley: University of California, 1988.
- [28] LYSMER J, BOLTON SEED H, SCHNABEL P B. Influence of base-rock characteristics on ground response[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, **61**(5): 1213-1231.
- [29] 张克绪, 谢君斐. 土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [ZHANG Kexu, XIE Junfei. Soil Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 1989. (in Chinese))
- [30] WANG S Y, ZHUANG H Y, ZHANG H, et al. Near-surface softening and healing in eastern Honshu associated with the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki Earthquake [J]. Nature Communications, 2021, **12**(1): 1215.
- [31] GAO F Q, KANG H P, LI J Z. Numerical simulation of fault-slip rockbursts using the distinct element method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, **110**: 103805.
- [32] MIAO Y, HE H J, LIU H B, et al. Reproducing ground response using in-situ soil dynamic parameters [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2022:1-17. <https://doi.org/10.1002/eqe.3671>.
- [33] 邢心魁, 李亚, 雷震霖, 等. 预应力钢绞线动态力学拉伸性能及本构关系[J]. 科学技术与工程, 2018, **18**(7): 228-233. (XING Xinkui, LI Ya, LEI Zhenlin, et al. Dynamic mechanical tensile properties and constitutive relationship of prestressed steel strand[J]. Science Technology and Engineering, 2018, **18**(7): 228-233. (in Chinese))

国际地下空间大会和第二届地下空间探测大会会议通知

ACUUS 2023-EUUS-2（国际地下空间大会和第二届地下空间探测大会）将于2023年11月1日—4日在新加坡召开。为了能够服务于更多学者，本次大会将在新加坡设置主会场，中国（徐州）设置分会场，通过虚拟平台实现国内外线上线下交流。大会网址为<https://www.acuus2023.com/>。

本届会议将围绕地下空间研究方向征集论文，包括地下建筑、地下空间实例研究、资源开发与空间利用等15个主题。组委会将遴选优秀论文，在Tunnelling and Underground Space Technology、Underground Space Journal和Deep Underground

Science and Engineering组建特刊。投稿链接<https://www.acuus2023.com/submit-form>。

组委会将举办青年论坛或青年学者全体会议，组委会将根据科学委员会的建议，挑选数名青年学者在青年学者全体会议上进行发言并颁发荣誉证书。

摘要提交截止日期2023年3月1日，摘要提交结果通知2023年5月1日，全文提交截止日期2023年6月15日，早鸟注册截止日期2023年9月1日。

（大会组委会 供稿）