

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231205001

某越江综合管廊河谷场地液化流滑侧向扩展研究*

李孝雄¹, 赵瑞兴¹, 庄海洋^{1,2}, 赵凯¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 液化引起河流阶地横向流滑会对长江下游的自然环境和建筑环境造成巨大破坏。然而, 长江下游宽河谷场地尺寸达几千米, 场地存在厚且松软的沉积层, 土层分布极不均匀。土壤的非线性和千米级横向变形限制了该类场地数值模拟的可计算性。针对长江下游宽河谷场地地形的复杂性和地层的特殊性, 并结合实际工程所在场地地质剖面, 建立了长江下游宽河谷场地精细化模型。采用已建立的砂土液化大变形粘弹塑性本构模型和ALE方法, 解决了该类场地流滑大变形模拟困难。考虑地震波类型和强度的影响, 分析了宽河谷微倾斜场地液化分布特征和侧向流滑规律。结果表明: 微倾斜可液化场地坡底处土层的液化程度最为严重, 微倾斜岸坡场地河床发生了明显的液化侧向扩展地震破坏, 揭示了宽河谷微倾斜可液化岸坡场地侧向扩展的空间变位特征, 上述原因主要是由于宽河谷不同位置处土单元应力状态差异性所造成; 通过与场地液化侧向扩展震害等级评价标准进行对比, 进一步明确了该长江下游宽河谷微倾斜岸坡场地液化流滑侧向扩展的震害特征及其程度。

关键词: 宽河谷场地; 长江岸坡; 土层液化; 侧向扩展; 震害特征

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0670-08

Research on Liquefaction-induced Lateral Spreading in the Valley Site of the Utility Tunnel Crossing the Yangzi River

LI Xiaoxiong¹, ZHAO Ruixing¹, ZHUANG Haiyang^{1,2*}, ZHAO Kai¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Liquefaction-induced lateral spreading on river terraces presents significant threats to the natural and built environments in the lower Yangtze River region. However, the extensive valley sites in the lower Yangtze River, spanning several kilometers, are characterized by thick, loose sediment layers with highly uneven distribution. The nonlinear behavior of soil and kilometer-scale lateral deformations pose challenges to numerical simulations of such sites. In this study, considering the complexity of the terrain and the specificity of the strata in wide valley sites of the lower Yangtze River, a refined model was developed based on geological profiles of actual engineering sites. Utilizing a sand liquefaction large deformation viscoelastic-plastic constitutive model and the ALE method, the study over-

* 收稿日期: 2023-12-05; 修回日期: 2024-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978333)、中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项(2020EEEEVL030)资助

作者简介: 李孝雄(1992—), 男, 博士生。主要从事土动力学和地下结构抗震研究。E-mail: lixx20201105@163.com

通信作者: 庄海洋(1978—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事土动力学和地下结构抗震与减隔震研究。

E-mail: zhuang7802@163.com

came the simulation challenges associated with large deformation flow sliding in these sites. Considering the influence of seismic wave types and intensities, the liquefaction distribution characteristics and lateral spread patterns of slightly inclined wide valley sites were analyzed. The results indicate that liquefaction was most severe at the base of the slope in slightly inclined liquefiable sites, and significant lateral spread seismic damage occurred in the riverbed of slightly inclined slope sites, revealing spatial displacement characteristics of lateral spread in slightly inclined liquefiable slope sites of wide valleys. This displacement is primarily attributed to variations in stress states of soil units across different positions within wide valleys. By comparing with evaluation criteria for liquefaction-induced lateral spread damage levels, the characteristics and extent of liquefaction-induced lateral spread damage in slightly inclined slope sites of wide valleys in the lower Yangtze River were further clarified.

Keywords: wide valley site; Yangtze River slope; soil liquefaction; lateral spread; damage characteristics

0 引言

地震过程中土体液化诱发的地面侧移是常见的地震破坏现象之一^[1]。例如1964年新潟地震、2008年汶川地震及2010年智利地震,均在微倾斜场地或近岸水平场地附近发生了较大的永久侧向位移^[2]。美国NRC指出:液化侧向扩展是具有普遍性和强大破坏性的一种液化破坏形式,由此造成的损失要比液化引起的其它地面破坏损失大的多。2018年印度尼西亚地震中Sulawesi岛发生了大规模的流滑,导致Balara村1747栋房屋被淹没,超过600人死亡,千余人失踪,致使4.7 km²村落因地表破坏几近消失^[3]。由此可见,地震作用下土体液化引起的场地流滑失稳对液化区建(构)筑物的震害尤为严重。

微倾斜场地土层由于具有初始静剪切应力,导致其液化变形与常规场地有所不同。关于微倾斜液化场地侧向扩展机制和动力响应规律的研究结果表明,微倾斜场地坡度和输入地震动强度是影响场地侧向扩展位移的主要因素^[4-5],且随着可液化土层坡度和输入地震动强度的增大,液化土层的侧向滑移方式将发生改变^[6-7]。长江下游宽河谷岸坡作为天然的微倾斜场地,地层中存在大量的新近沉积无粘性土,在强地震发生时极易造成长江岸坡产生液化流滑侧向扩展的地震灾害,且该场地作为一种局部不规则地形,也将会造成场地地震局部放大效应和空间非一致性^[8-9]。上述震害对越江跨海隧道、桥梁和电力管廊等结构安全产生严重的地震威胁。

综上所述,本文基于有限元分析方法,以长江

下游某过江电力综合管廊隧道所处的宽河谷场地为工程背景,采用本文作者已开展的长江下游河谷场地饱和粉细砂动力学特性室内实验获得的动力学计算参数,利用已建立的砂土液化大变形动力本构模型描述河谷场地可液化土的动力大变形特征,并考虑宽河谷微倾斜场地真实的地形特征和土层非均匀空间分布,借助南京工业大学高性能计算平台,建立宽河谷微倾斜可液化岸坡场地非线性地震响应的静、动力耦合有限元分析模型。通过改变输入地震波类型和地震动强度,系统地分析了宽河谷可液化场地的液化分布特征及其侧向流滑规律,并将数值模拟结果与《建筑工程抗震性态设计通则》^[10]中震害等级预测结果进行对比分析,评判了预测方法对宽河谷可液化场地的适用性。

1 数值分析方法的建立

1.1 宽河谷场地工程地质概况

某越江综合管廊河谷两岸地势平坦,具有宽广的多级阶地和漫滩,河谷坡度一般为1°~2°,坡度明显缓于常规河谷。由于长江下游独特的沉积环境,在阶地上形成了第四系全新统河湖相冲积层,该冲积层具有典型二元结构沉积韵律^[11],且在沉积过程中局部水动力条件变化在砂层中形成透镜体,宽河谷场地土层分布如图1所示。每年大量的砂子被带到长江下游并沉积,形成了非常厚且松散的砂层,砂层中的砂是典型的南京砂,较其它标准砂易液化^[12],再加上沉积环境的独特性,造成了长江下游微倾斜岸坡场地砂层更易液化,且南京砂在初始液

表1 工程场地土层基本参数

Table 1 Basic parameters of soil strata in engineering site

名称	内摩擦角/(°)	剪切波速/(m·s ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
①1 粉细砂	34.2	130	1.96	4.5	0.37
①2 粉砂	33.9	160	1.93	7.8	0.34
② 粉质黏土	24.7	240	1.89	2.3	0.37
③1 淤泥质粉质	21.3	100	1.8	1.5	0.39
③2 粉土与粉质	25.3	250	1.83	6.5	0.34
③3 淤泥质粉质	23.6	160	1.8	2.5	0.39
④1 粉质黏土混	24.5	180	1.81	5.2	0.34
④1-1 粉细砂	35.2	300	1.91	9.2	0.29
④2 粉土	28.6	260	1.82	10.5	0.32
⑤1 粉细砂	34.0	300	1.96	22.9	0.29
⑤1-2 中粗砂	33.6	330	2.02	40.9	0.26
⑤2 细砂	35.2	320	1.98	48.0	0.27
⑥1 中粗砂	38.2	330	2.02	37.5	0.25
⑥1-1 粉砂	31.6	360	1.93	26.0	0.34
⑦ 粉细砂	35.2	390	2	42.4	0.24

了大量倾斜场地流滑,从而导致海岸工程产生较为严重的破坏。绵竹清平波和什邡八角波是2008年汶川地震中记录的近场地地震波。本研究选取地震波的N-S分量作为输入地震波,并截取含有峰值加速度时刻的30s。Kobe波与什邡八角波的加速度时程曲线及反应谱见文献[16],绵竹清平波加速度时程曲线和反应谱如图3所示。根据文献[17]对地震波的分类可知,本文中绵竹清平波PGA/PGV=1.22,属于高频波;Kobe波PGA/PGV=0.918,属于

中频波;什邡八角波PGA/PGV=0.508,属于低频波,故所选地震波覆盖高、中、低3个频率。通过调整原始的峰值加速度,将输入的三条地震波强度(PBA)调整为0.10g、0.15g和0.20g,地震波从模型地底部水平向输入。

2 场地液化流滑分析

2.1 场地液化分布特征

计算结果分析表明,即使地震波类型不同,但输入地震动强度对场地液化分布特征的影响具有相同规律。液化土层主要分布在①₁、①₃土层。因此,图4给出了输入不同强度Kobe地震波下①区域(图2)的液化分布特征。图中灰色区域表明砂土已发生液化(动孔压比大于1.0时,认为土体已经发生液化)。

如图4所示,当地震波加载结束后,本文所有输入地震动强度下坡体土层均发生明显的液化现象,液化土层主要分布在各微倾斜边坡的坡面一定深度和坡底的完全厚度范围内。表明微倾斜场地斜坡体内的土体相对坡底处土体更不容易产生液化,造成上述液化分布差异的主要原因应为斜坡体内土单元和坡底土单元的受力状态存在差异(图5)^[18],从坡顶到坡底位置发生变化,土体单元的受力状态由三轴压缩状态逐步转换为三轴拉伸状态,非常值得进一步开展斜坡体内不同位置土单元初始应力状态的室内试验验证,并研究上述变化规律。

表2 饱和粉细砂动力学计算参数

Table 2 Dynamic calculation parameters of saturated silty sand

参数	参考剪切模量	初始压应力	模量孔压影响指数	摩擦角	剪胀角	残余强度压力
数值	$G_0 = 33 \text{ MPa}$	$P_0 = 100 \text{ kPa}$	$n_p = 0.5$	$\phi = 32^\circ$	$\phi_{pi} = 28^\circ$	$a = 5 \text{ kPa}$
参数	收缩参数	硬化参数	膨胀参数	液化流动变形参数	控制液化流动压力阈值	液化流动变形控制参数
数值	$c_1 = 0.15, c_2 = 0.5$	$e_1 = 0.8, e_2 = 2.8$	$d_1 = 0.3, d_2 = 100$	$y_1 = 0.01, y_2 = 0$	$P_y = 0.5 \text{ kPa}$	$y_{sl} = 0.01$

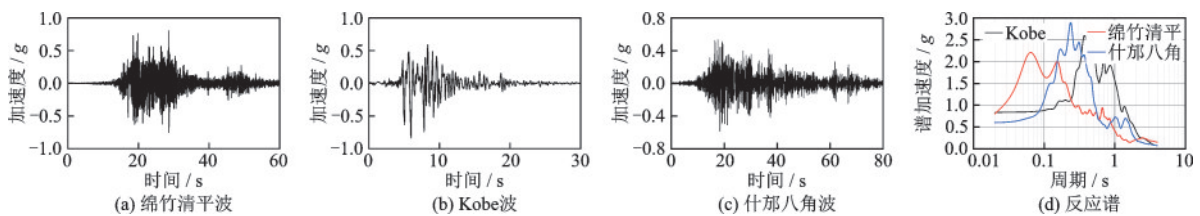


图3 地震波时程曲线及加速度反应谱

Fig.3 Seismic wave time-history and acceleration response spectrum

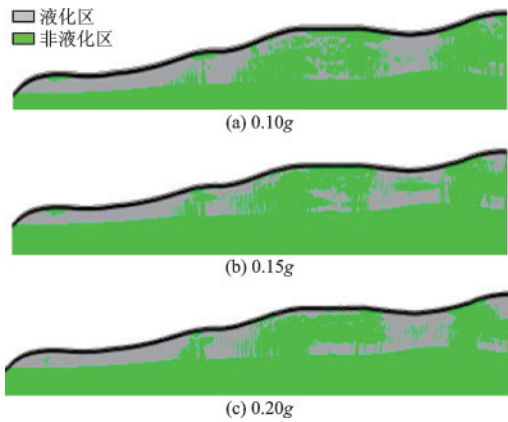


图4 土层液化分布特征

Fig.4 Characteristics of soil liquefaction distribution

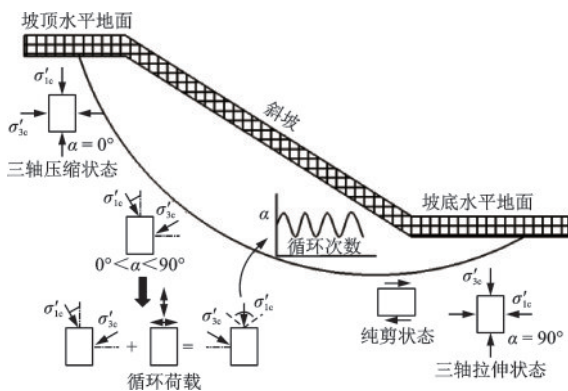


图5 强地震作用时斜坡体内土单元应力状态空间变化

Fig.5 Spatial variation of stress state of soil elements within sloping bodies under strong earthquake action

2.2 场地液化流滑特征

长江下游宽河谷微倾斜岸坡场地在地震波作用下具有强烈的非线性地震反应特征,尤其是微倾斜场地液化后很容易造成河谷岸坡产生侧向扩展,进而导致越江重大工程结构的地震破坏。鉴于此,图6和图7分别给出了不同强度和不同类型地震波加载结束后不同路径上地层各节点与地基地部节点相对侧向位移曲线。

如图6所示,河谷场地南岸B区土层相对侧向位移远大于A区土层,进一步说明河谷微倾斜场地液化引起的场地侧向扩展研究尤为重要。总体来看,A区非液化场地的地面最大侧移只有厘米级,但B区地面最大侧向扩展达到米级,其中B区侧向位移主要由浅层液化土层的相对液化流滑大变形引起。宽河谷微倾斜岸坡场地沿着液化层和非液化层分界面产生侧向滑移,滑移方向与坡体方向一致,较大的侧向滑移均发生在具有一定坡度的坡体

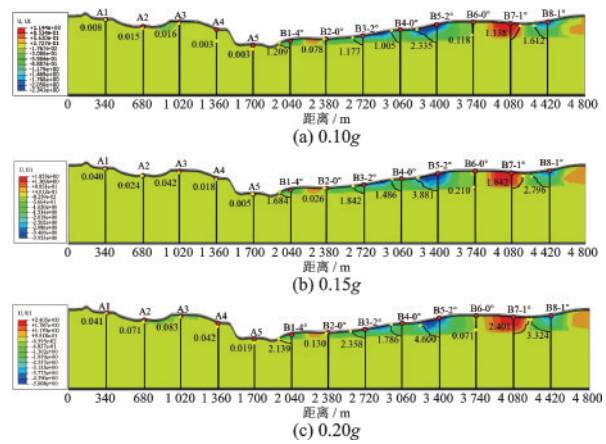


图6 Kobe地震波作用下土层相对侧向位移

Fig.6 Relative lateral displacement of soil layers under Kobe seismic wave

地表位置处,其中在斜坡体的中间位置处产生最大滑移。虽然B4处坡度为零,但地震波加载结束后仍产生了较大的侧向位移,其主要原因是B4位于微倾斜岸坡的下方,因边坡上方坡体侧向扩展挤压而导致该位置的地面产生较大的地面侧向位移。总体来看,各坡体内地表侧向扩展主要由液化土层内的相对侧移累积造成,沿深度方向土层的相对侧移主要发生在可液化土层下部,然后沿深度向上缓慢增加到地表。需要说明的是,B7点岸坡倾斜方向与其它位置相反,因此B7位置处地面侧向扩展方向也发生了改变,坡体向B7和B8之间的谷底产生侧移。由B5位置处液化土层沿深度的相对侧移曲线形状可以发现明显的突变现象,说明该位置处的土层相对侧移并非沿深度方向连续变化,有局部流滑现象。总体来看,宽河谷微倾斜多级岸坡场地液化侧向扩展位移量存在明显的空间变化特征,这一现象将对穿越该类场地的多桥墩特定桥梁结构或盾构隧道的纵向地震反应产生很大影响。

如图7所示,就输入地震动强度而言,随输入地震动峰值加速度的增加,宽河谷微倾斜场地的地面侧向扩展也快速增加,其中输入地震动峰值加速度达到0.20g时B5处的侧向扩展量最大且达到了4.6m。就输入类型不同但峰值加速度相同的地震波而言,宽河谷微倾斜场地的液化地面侧向扩展最大值也发生明显的差异,同一位置处输入什邡八角波的地面侧向扩展幅值最大,输入Kobe波的计算结果居中,输入绵竹清平波的计算结果最小,即随着输入地震波从高频波变化到低频波,其侧移量越来

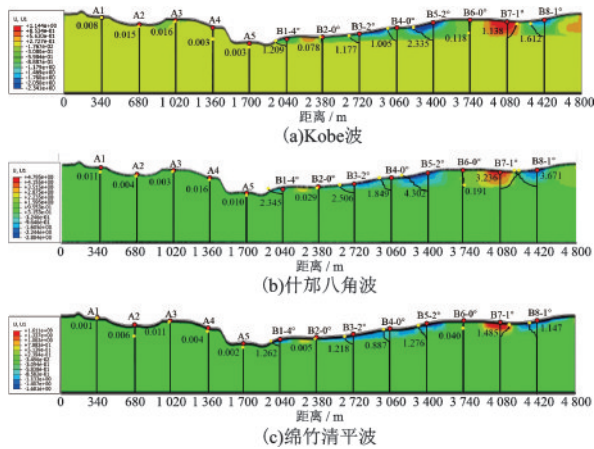


图7 不同类型地震波作用下土层相对侧向位移(0.10g)
Fig.7 Relative lateral displacement of soil layers under different types of seismic waves (0.10g)

越大。输入地震波的频谱特性的影响规律还有待进一步研究。

如图6~图7所示, B2~B6存在着多级岸坡, 且侧向流滑位移较大区域主要集中在该区段。因此, 选取了多级岸坡的坡底B2、第一级岸坡的坡底B4、坡中B5和坡顶B6为研究点, 进一步探究宽河谷微倾斜岸坡场地土层侧向位移随时间的变化规律。图8给出了该些位置土层相对侧向位移时程曲线。相关研究表明侧向位移时程曲线变化趋势与地震波速度时程曲线具有更好的相似性^[19]。因此, 图8中绘制了Kobe波速度时程曲线用于深究土层侧向相对位移与地震波加载时刻之间的对应关系。

如图8所示, 宽河谷微倾斜可液化场地在地震波加载期间发生了较大的侧向位移, 根据土层相对侧向位移时程曲线变化趋势可以将其分为三个阶段: 第一阶段在地震波作用下土层未产生明显的侧向位移, 此阶段加载地震波未达到强震时刻; 第二阶段前期土层发生同步的左右剧烈晃动, 随着到达主振阶段, 坡体在短时间内沿着坡体方向产生了较大的侧向位移; 第三阶段随着主振阶段的结束, 土层相对侧移的增长速度明显下降, 但侧移并未停止, 该阶段的侧移增量约占总侧移量的1/3。

第二阶段B5点先于其它点开始产生侧向滑动, 当侧向累计位移较大时, B4点开始侧向滑动, 说明B4点的侧向滑动是由于坡体上方的地面侧向扩展挤压导致, 且在10s左右B5点侧向位移增加速率最大, 结合图7可以初步判断B5点所在区域该时刻产生了局部流滑现象。第三阶段相对侧移以较小的

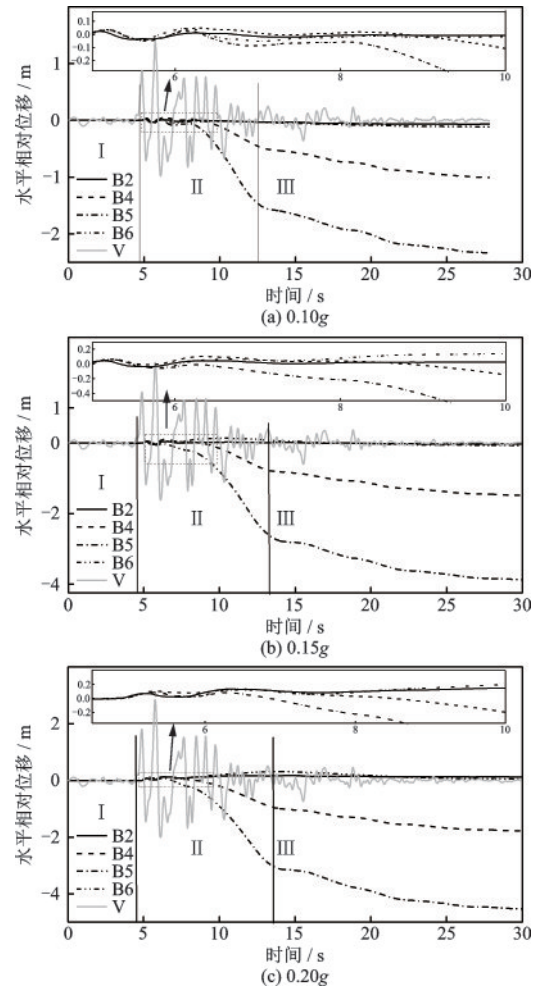


图8 液化土层相对位移时程曲线
Fig.8 Time-history curve of relative displacement of liquefied soil layers

增幅继续增大, 此阶段的变化主要是由于坡体中液化土层在重力作用下沿着坡体方向缓慢滑动引起。因此, 长江下游宽河谷微倾斜可液化场地修建越江重大工程结构应重点考虑局部流滑区域结构的安全性, 且评估此类场地液化侧向流滑灾害时, 应考虑地震结束后液化土层的缓慢滑动。

3 场地液化侧向扩展评价

根据宽河谷微倾斜可液化岸坡场地非线性地震响应的静、动力耦合有限元模型模拟结果, 选取B1~B6区域14条等距路径上液化层厚度、地表加速度和地面侧向位移的平均值作为地面侧移等级判别标准的基本参数, 并对照《建筑工程抗震性态设计通则》^[10]中提出的关于缓坡场地液化引起的地面侧移等级, 判别B1~B6区域地面侧移等级。通

则中地面侧移等级判别有两种方法:(1)基于地面侧向位移量划分为轻微(0~0.3 m)、中等(0.3~0.5 m)、严重(0.5~1.0 m)及非常严重(>1.0 m)四个等级;(2)综合考虑了液化层厚度、设计地震加速

度(PGA)、缓坡坡度S及细粒土含量开展侧移等级判别。分别利用上述两种方法判别B1~B6区域地面侧移等级,见表3。表3基于不同判别标准对比分析。

表3 不同评价方法对比分析

Table 3 Comparative analysis of different evaluation methods

地震波	PBA/g	液化层厚度/m	PGA/g	坡度S/(°)	平均细粒含量/%	侧向位移/m	方法1	方法2
Kobe	0.10	6.73	0.269	1.8	15	1.046	非常严重	严重
	0.15	7.81	0.318			1.614	非常严重	非常严重
	0.20	8.15	0.342			1.972	非常严重	非常严重
什邡八角	0.10	5.94	0.170			1.260	非常严重	中等
	0.15	6.95	0.208			1.838	非常严重	严重
	0.20	7.17	0.222			2.290	非常严重	严重
绵竹清平	0.10	7.18	0.198			0.823	严重	严重
	0.15	7.28	0.211			1.628	非常严重	严重
	0.20	7.58	0.222			2.310	非常严重	严重

由表3可知,基于方法(1)判别等级基本上非常严重,除输入绵竹清平波峰值加速度0.10g时为严重。基于方法(2)判别地面侧移等级主要为严重,输入Kobe波的峰值加速度为0.15g和0.2g时等级为非常严重。造成上述不同方法预测结果之间差异的主要原因应与本文中微倾斜多级岸坡场地的液化层厚度及其地面侧移的取值方法有关。此外通则中仅针对一般微倾斜场地,而宽河谷微倾斜地形复杂,存在多级缓坡的侧向扩展累积,同时河谷地形存在明显的地震放大效应^[20],导致场地地面侧移扩展的空间变异性和复杂性。

4 结 论

本文通过建立宽河谷微倾斜可液化岸坡场地非线性地震响应的静、动力耦合有限元分析模型,研究了输入地震波类型和地震动强度对长江下游某宽河谷微倾斜可液化岸坡场地地面侧向扩展运动的影响规律,并与已有相关评价结果进行对比分析,进一步突破对宽河谷微倾斜可液化多级岸坡场地液化侧向扩展运动的认识局限性,并得出主要结论如下:

(1)宽河谷微倾斜可液化多级边坡场地在地震动作用下坡底处土层液化程度最高,且坡体可液化土层发生了明显的液化侧向流滑扩展。

(2)长江下游宽河谷微倾斜可液化多级岸坡场地液化侧向扩展变形规律存在明显的空间差异性,

导致场地不同位置的相对侧移量差异较大,对穿越该类场地的多桥墩特定桥梁结构或盾构隧道结构等过江通道属于抗震非常不利地段。

(3)基于地面侧移等级标准判别的结果普遍低于本文的模拟结果,但总体上判别等级较为接近。鉴于宽河谷微倾斜多级岸坡场地地震反应的空间差异性,建议采用该类场地不同位置处液化层厚度和地面侧移量的平均值进行场地的震害评价和预测。

(4)微倾斜岸坡可液化场地不同位置处土单元应力状态的变化造成了土层液化空间分布的差异性,因此,倾斜可液化场地不同初始应力条件下饱和和可液化土动力学特性仍有待进一步研究,为该类场地的液化判别和地层地震变形的精准预测提供可靠的科学依据和理论支撑。

参考文献:

- [1] 吴琪,徐雨,陈国兴.我国近20年11次地震的土壤液化灾害回顾[J].防灾减灾工程学报,2022,42(5):961-975.
Wu Q, Xu Y, Chen G X. Review of soil liquefaction manifestation and its consequences for 11 earthquakes in china over the last 20 years[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 961-975. (in Chinese)
- [2] Chen G X, Wu Q, Sun T, et al. Cyclic behaviors of saturated sand-gravel mixtures under undrained cyclic

- triaxial loading[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2021, 25(4): 756-789.
- [3] Sassa S, Takagawa T. Liquefied gravity flow-induced tsunami: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters [J]. *Landslides*, 2019, 16(1): 195-200.
- [4] Tang L, Zhang X Y, Ling X Z, et al. Response of a pile group behind quay wall to liquefaction-induced lateral spreading: a shake-table investigation[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2014, 13(4): 741-749.
- [5] 潘霞, 许成顺, 徐佳琳, 等. 饱和砂土循环液化模式影响因素试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(3): 635-642.
Pan X, Xu C S, Xu J L, et al. Experimental study on influencing factors of circulating liquefaction model of saturated sand soil [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(3): 635-642. (in Chinese)
- [6] Zhuang H Y, Wang R, Chen G X, et al. Shear modulus reduction of saturated sand under large liquefaction-induced deformation in cyclic torsional shear tests [J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 110-122.
- [7] Zhuang H Y, Yang J, Chen S, et al. Liquefaction performance and deformation of slightly sloping site in floodplains of the lower reaches of Yangtze River [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217(11): 107869.
- [8] 刘中宪, 周健, 李程程, 等. 基于修正随机有限断层法的沉积盆地地震动模拟[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(5): 999-1008.
Liu Z X, Zhou J, Li C C, et al. Seismic simulation of sedimentary basin based on modified stochastic finite fault method [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(5): 999-1008. (in Chinese)
- [9] Huang H C, Chiu H C. Canyon topography effects on ground motion at Feitsui dam site [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 1999, 18(2): 87-99.
- [10] 建筑工程抗震性态设计通则: CECS 160—2004 (2019) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [11] 张景顺, 张世殊, 周光明, 等. 平缓细粒土岸坡水库塌岸机理研究 [J]. *工程地质学报*, 2016, 24(5): 752-759.
Zhang J S, Zhang S S, Zhou G M, et al. Collapse mechanism of gentle inclined and fine-grained soil slope on reservoir bank [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(5): 752-759. (in Chinese)
- [12] Chen G X, Liu X Z, Zhang J Y. Undrained dynamical behavior of Nanjing flake-shaped fine sand under cyclic loading [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(2): 215-221.
- [13] Zhuang H Y, Yang J, Chen S, et al. Statistical numerical method for determining seismic performance and fragility of shallow-buried underground structure [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 116: 104090.
- [14] 庄海洋, 陈国兴, 朱定华. 土体动力粘塑性记忆型嵌套面本构模型及其验证 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(10): 1267-1272.
Zhuang H Y, Chen G X, Zhu D H. Dynamic viscoplastic memorial nested yield surface model of soil and its verification [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(10): 1267-1272. (in Chinese)
- [15] 庄海洋, 陈国兴. 对土体动力黏塑性记忆型嵌套面模型的改进 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 118-122.
Zhuang H Y, Chen G X. Improvement of dynamic viscoplastic memorial nested yield surface model of soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 118-122.
- [16] Zhuang H Y, Yang J, Chen S, et al. Seismic performance of underground subway station structure considering connection modes and diaphragm wall [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 127: 105842.
- [17] Yang J, Zhuang H Y, Wang W, et al. Seismic performance and effective isolation of a large multilayered underground subway station [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 142: 106560.
- [18] 马维嘉. 复杂应力条件下饱和南沙珊瑚砂液特性试验研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2021.
Ma W J. Experimental study on the liquefaction characteristic of saturated nansha coral sand under complex stress conditions [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2021. (in Chinese)
- [19] 王豪, 高广运, 王禹. 地震荷载作用下可液化微倾场地侧向变形研究 [C] // 2016 年全国工程地质学术年会论文集. 2016: 102-109.
Wang H, Gao G Y, Wang Y. Study on lateral spreading of liquefiable and inclined ground under earthquake [C] // 2016 National Engineering Geology Annual Conference Proceedings. 2016: 102-109. (in Chinese)
- [20] 高玉峰, 代登辉, 张宁. 河谷地形地震放大效应研究进展与展望 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(4): 734-752.
Gao Y F, Dai D H, Zhang N. Progress and prospect of topographic amplification effects of seismic wave in canyon sites [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(4): 734-752. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)