

基于 OpenSees 的梯形河谷场地反应谱 平台值调整方法研究*

李 平^{1,2}, 张宇东², 李巨文², 辜俊儒², 朱 胜², 李玉影²

(1. 东北林业大学 工程咨询设计研究院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 防灾科技学院 地质工程学院, 河北 三河 065201)

摘要: 以梯形河谷场地为研究对象, 采用 OpenSees 有限元程序对深厚河谷场地进行了数值模拟, 研究不同河谷坡角、深宽比、覆盖层厚度对地表地震动反应谱的影响程度, 得到了其地震动规律。结果表明: 坡角、深宽比对反应谱的特征周期影响不显著, 但对反应谱的平台值影响显著; 通过数学统计方法给出了地表地震动反应谱平台值修正系数表。

关键词: OpenSees; 河谷场地; 地震动; 反应谱; 抗震设计

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2020)03-0563-06

0 引言

我国是一个多山地的国家, 河谷型城市广泛存在, 这类城市主体在河谷中形成和发育, 一般随地形、河流走向布局 and 延伸, 位于沟谷或河谷中。随着经济和城市的快速发展, 大量建(构)筑物修建在河谷场地上, 而我国现行的抗震设计规范未对河谷场地的设计地震动参数做出明确的规定, 给这些建(构)筑物的抗震设防留下了潜在的危险, 特别是对高烈度区的河谷城市的建(构)筑物。河谷场地的设计地震动参数往往涉及到河谷场地的地震动分布规律, 受深厚覆盖层和河谷地形共同作用的影响, 深厚覆盖层的河谷场地的地震动分布规律更为复杂。

震害调查表明河谷场地对地震动有着重要的影响, 宁夏海原大地震、云南通海地震、辽宁海城地震后, 均在其河谷场地出现了地震动异常现象, 并导致了严重震害(肖文海, 2009)。汶川地震中, 河谷地形效应导致汉源震害异常(李平, 2013), 安昌镇安易河、青川大坝山河、什邡市石亭江、平武县涪江、甘肃白水河、湍江以及青川东阳河等场地都出现了震害随河谷场地位

置不同而变化的现象, 也证明了河谷场地的地震动效应(王伟, 2011)。

目前, 研究河谷场地地震动效应的主要方法有强震记录分析法、解析法和数值模拟法, 每种方法有各自的优点和局限性。强震记录分析法基于大量有效的强震记录采用传统谱比法和广义强震记录分析法等进行分析研究(任叶飞等, 2013; 王海云, 2011), 该方法受限于强震记录的获取, 在其研究应用领域上有一定局限性。解析法利用数学及力学方法对形状简化成半圆或半椭圆凹陷的河谷场地进行解析求解, 得到了影响地震动的因素主要是输入地震的入射角、波形以及河谷的形状(梁建文等, 2000, 2001, 2002a, b, 2003), 该方法对河谷形状以及土层等因素进行了简化处理, 分析模型与实际河谷场地相差较大, 所得结果大都为定性分析结果。数值模拟法克服上述两种方法的局限性, 随着计算机技术的高速发展, 该方法在场地地震反应分析中得到了广泛的应用和发展。有限元、无限边界元、边界元及谱元法等方法被国内外学者应用到研究地震动河谷场地效应中, 发现河谷场地的地震动的入射角、坡角、深宽比等对地震动特性有着重要的影响(金丹丹等, 2014; 陈清军等, 2013; 宋贞

* 收稿日期: 2019-08-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508096)和中国地震局地震科技星火计划项目(XH15067Y)联合资助.

震, 丁海平, 2013)。由于基础资料不足, 目前大多数研究主要集中于对深 V 和 U 型河谷的研究, 对适宜人居住和发展的梯形河谷场地研究较少, 且其工程应用还有大量的研究工作需要开展。另外, 研究模型中土层非线性的影响很少被考虑, 有些模型为简单或者某一具体的河谷场地, 成果不具有代表性和普遍性, 不能应用于抗震设计规范中。

为了探究不同河谷坡角、深宽比、覆盖层厚度对地表地震动反应谱的影响程度, 本文采用 OpenSees 有限元程序对 9 个工况下的梯形河谷场地进行数值模拟, 得到各个监测点的加速度反应谱, 分析了坡角、深宽比、覆盖层厚度对反应谱特征周期和平台值的影响, 通过数学统计方法给出了地表地震动反应谱平台值修正系数表。

1 数值分析方法

OpenSees 是目前被广泛应用的有限元开源程序, 可用于土木工程的地震反应分析, 它是美国太平洋工程中心开发的开源地震工程数值模拟有限元框架的简称 (Open System for Earthquake Engineering Simulation)。由于该程序源代码完全公开, 因此使用者可以对材料本构模型、模型单元形式和求解算法进行二次开发。多个土本构模型被嵌入 OpenSees 框架, 如 Pressure Independ Multi Yield (PIMY), Pressure Depend Multi Yield (PDMY) 和 Pressure Depend Multi Yield02 (PDMY02) 是最常用的几个模型。PIMY 是一种在偏应力 - 应变条件下才显示塑性的弹塑性材料模型, 它的体积应力 - 应变状态是线弹性应力 - 应变响应, 且不受偏应力 - 应变响应影响。PIMY 可模拟剪切行为对约束改变不敏感的实际材料在单调荷载或者循环荷载下的响应, 如含有机质土或黏土; PDMY 和 PDMY02 是模拟砂土的本构模型, 都是弹塑性模型, 区别在于 PDMY02 模型添加了考虑压缩过程中剪胀影响等参数 (Yang *et al*, 2000, 2002, 2003, 2008), 使用者可以通过参数设置来反应弹性状态和弹塑性状态, 该模型可以很好地反应土非线性, 被广泛地应用于土体地震反应分析中。

数值模拟中采用四节点四边形双相介质单元 (quadUP), 该单元模型基于 Biot 理论将饱和土作为两相材料, 即土骨架位移 u 和孔隙水压力 p 为主要的未知数 ($u-p$ 方程)。为了保证稳定条件和有限元计算的准确性, 根据已有的研究成果, 针对某一波长的地震波, 单元尺寸为波长的 $1/8 \sim 1/12$ 时即满足要求。因此, 本文数值计算模型采用的单元尺寸为 0.5 m, 满足了稳定条件和离散化准则要求。

2 计算模型与参数

本文建立概化的河谷场地模型, 倾角分别为 30° , 45° 和 60° 。在河谷深度不变、不同倾角工况下, 调整河谷宽度使其深宽比分别为 0.5, 1.0 和 2.0, 得到 9 个数值计算模型, 模型如图 1 所示。土体分为 3 层, 表层为黏土 (5 m), 其下分别是密实砂土 (50 m) 和碎石层 (50 m)。该 3 组模型主要是考虑土非线性分析河谷倾角、深宽比和覆盖层厚度 (本文覆盖层厚度为地表土层距基岩深度) 对地震动的影响, 模型总长为 240 m。由于模型为对称形式, 每个模型监测点布设为右侧地表, 间距为 2 m, 总共 38 个。已有研究成果表明距离坡角 100 m 为河谷场地地震动效应显著位置, 因此上述监测点布设可以反应河谷场地地震动效应。同时, 为了分析河谷场地地形效应, 建立水平成层场地模型, 模型土层和河谷场地相同。水平成层场地在 30 m, 50 m 和地表设监测点来分析覆盖层厚度对地震动的影响, 以及检验数值模拟方法的可靠性。

考虑不同频谱特性和峰值的影响, 计算输入地震动如图 2 所示, 由图可知, 3 条地震动的频谱特性有明显的不同, Kobe 波主要频段周期为 0.1 ~ 0.4 s, Northridge 波主要频段周期为 0.4 ~ 0.6 s, Joshua 波主要频段周期为 0.4 ~ 1.0 s, 因此 3 条地震动的频段范围为 0.1 ~ 0.1 s, 该频谱范围可反映场地地震动频谱效应。计算模型中黏土 PIMY 计算参数采用经验推荐值, 见表 1。砂土和碎石 PDMY02 计算参数参考已有文献选取 (Boulanger *et al*, 2006; Boulanger, Tokimatsu, 2006; Rayamajhi *et al*, 2016a, b; Zana, Shideh, 2016), 见表 2。

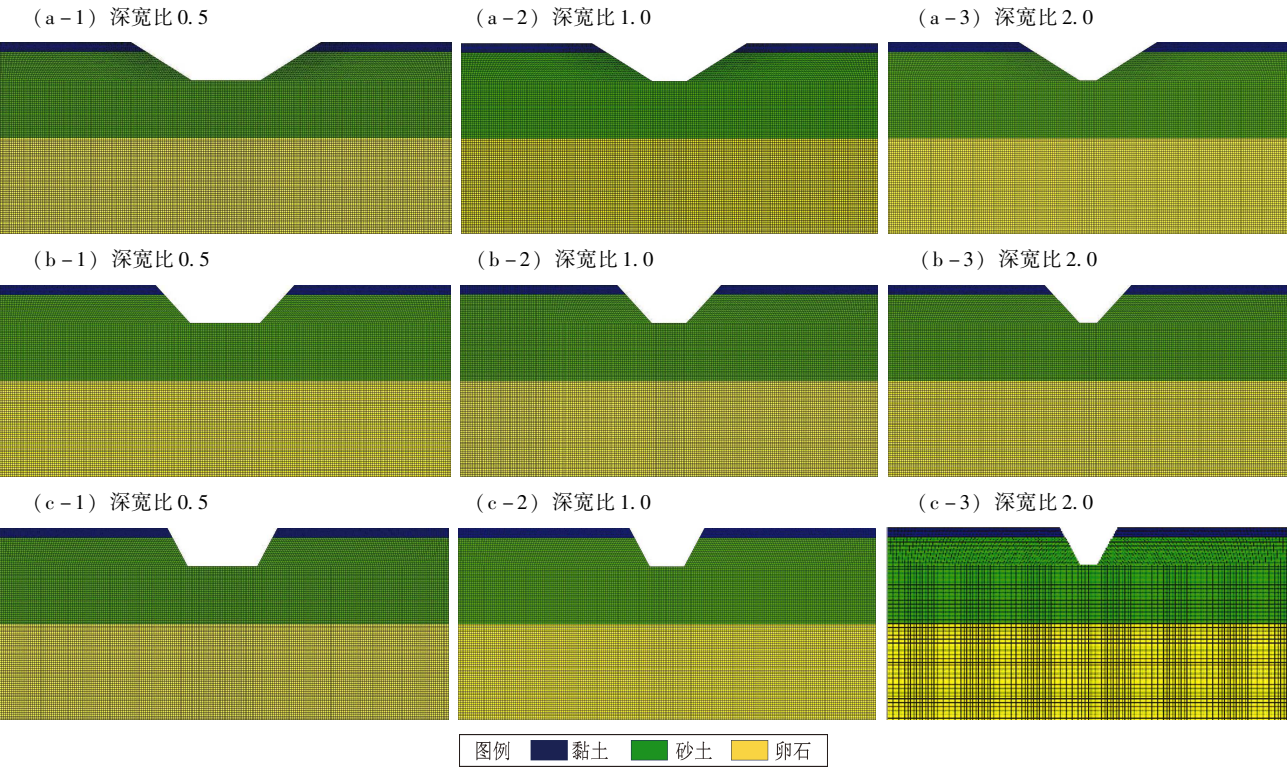


图 1 倾角分别为 30° (a), 45° (b), 60° (c) 的计算模型示意图

Fig. 1 Computational models diagram with inclination angle of 30° (a), 45° (b), 60° (c)

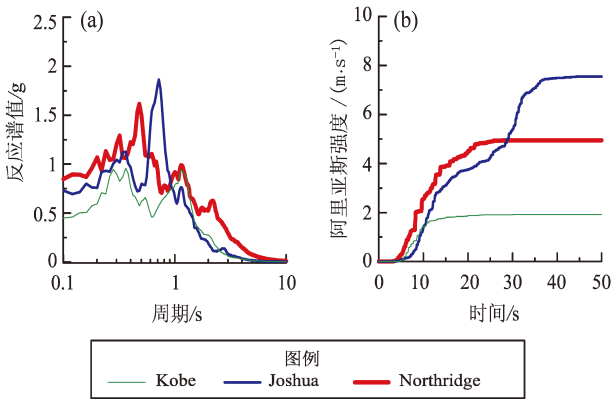


图 2 输入地震动反应谱 (a) 及阿里亚斯强度 (b) of input ground motion

表 1 黏土 PIMY 参数
Tab. 1 PIMY parameters of clay

参数	黏土	性质描述
$\rho/(\text{ton}/\text{m}^3)$	1.8	饱和密度
G_{\max}/kPa	1.5×10^5	最大剪切模量
γ_{\max}	0.1	最大剪应变
Br/kPa	7.5×10^5	体积弹性模量
c/kPa	75	黏聚力

表 2 土体 PDMY02 参数
Tab. 2 PDMY02 parameters of soils

参数	砂		碎石	性质描述
$Dr\text{ (}\%\text{)}$	40	90	50	相对密度
e	0.70	0.55	0.45	孔隙比
$\rho/(\text{ton}/\text{m}^3)$	1.94	2.03	2.14	饱和密度
$G_{\text{max}}/\text{MPa}$	108.5	130	128.0	最大剪切模量
γ_{max}	0.1	0.1	0.1	最大剪应变
Br/MPa	283.0	339.0	240.0	体积弹性模量
$\psi_{\text{sc}}/(\text{ }^\circ)$	31.3	41.5	43.3	内摩擦角
$\psi_{\text{PT}}/(\text{ }^\circ)$	27.5	28.0	36.5	相位角
c_1	0.045	0.070	0.0050	常数、非负数
c_2	1.5	4.0	0.50	常数、非负数
c_3	0.50	0.95	0.0	常数、非负数
d_1	0.03	0.010	0.40	常数、非负数
d_2	3.0	3.0	3.0	常数、非负数
d_3	0.0	0.0	0.0	常数、非负数
NYS	44	99	20	屈服面个数
liq_1	1.0	1.0	1.0	常数、非负数
liq_2	0	0	0	常数、非负数
P_r/kPa	101	101	101	参考有效围压
$k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	0.014 1	0.011 9	2.9	渗透系数

3 计算结果

为分析深厚覆盖层河谷场地对地震动的影响,采用相同的计算方法和土体参数计算了水平成层场地地震反应分析,设获得的同一覆盖层厚度地表地震动反应谱值为基本值,来对比分析对河谷场地地表反应谱的影响。通过计算得到了地表地震动,采用差分进化算法对反应谱进行标定,得到了覆盖层厚度分别为 30 m, 50 m 和地表的规范反应谱,如图 3 所示。结果表明,非软弱场地覆盖层越厚,反应谱平台值越高,符合目前认识规律,也证明本文计算方法和参数选用是基本合理的。

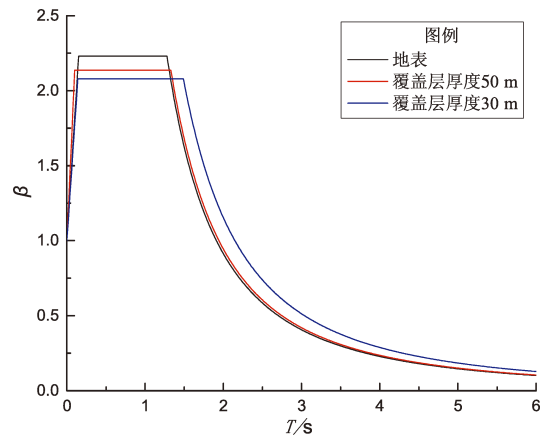


图3 水平呈层场地标定后的反应谱

Fig. 3 The calibrated response spectra of horizontal layered site

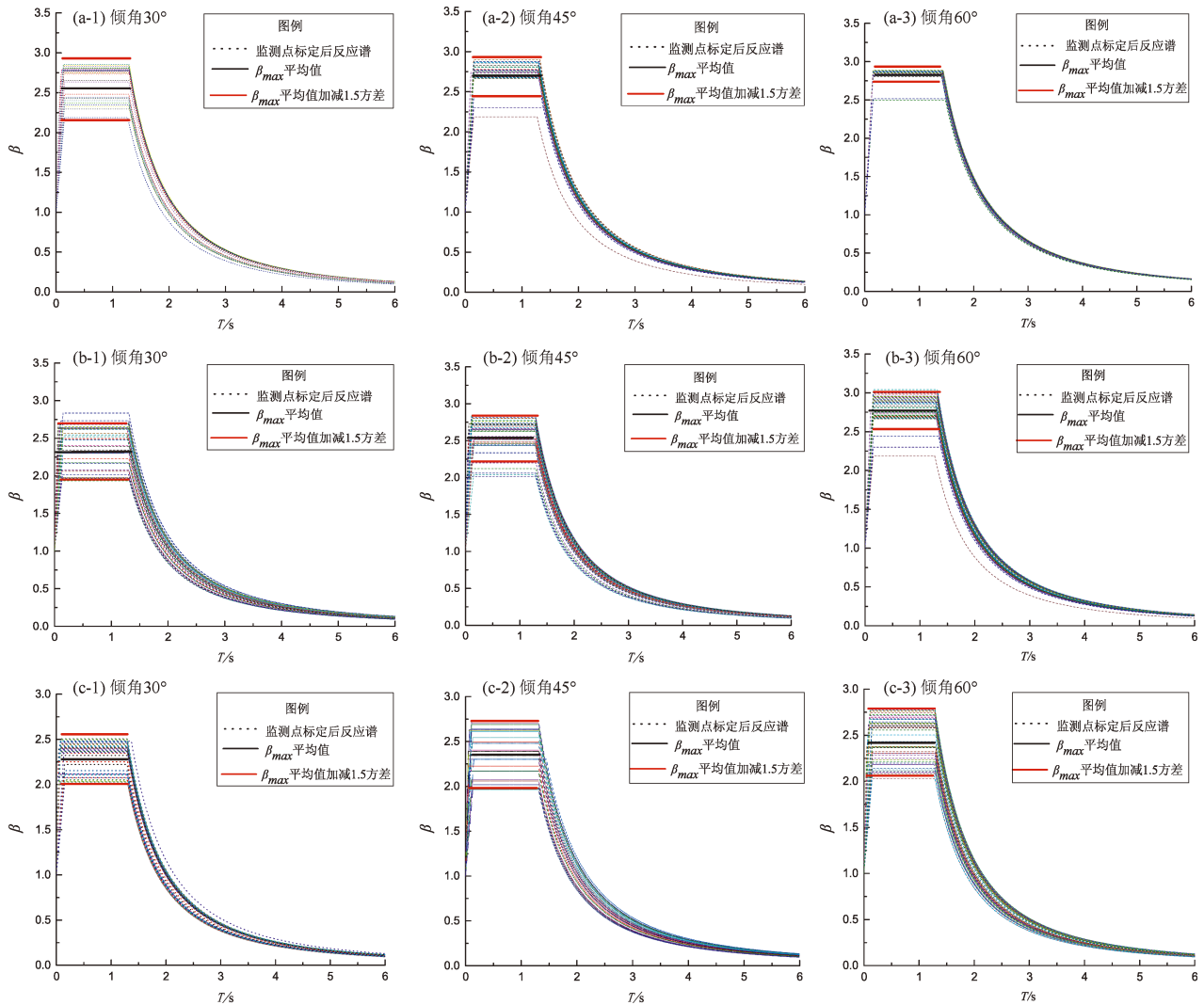


图4 标定后的深宽比为 2.0 (a), 1.0 (b) 及 0.5 (c) 反应谱及拟合值

Fig. 4 The calibrated response spectra and fitting values with different depth-width ratio of 2.0 (a), 1.0 (b) and 0.5 (c)

输入不同地震动计算得到了不同深宽比和倾角的地表地震动和反应谱，采用差分进化算法标定得到地表地震动规准反应谱（赵培培等，2017），同时采用最小二乘法对所得的规准化反应谱进行拟合得到规准反应谱的平均谱，从而得到规准反应谱平台值的平均值和拟合方差，如图 4 所示。由方差可知，统计分析数据离散波动不大，所得到的规准反应谱平台值的平均值是可信的。由图 4 可知，相同倾角深宽比越大，反应谱的特征周期减小，但影响不显著，反应谱的平台值越大，但影响不显著；相同深宽比倾角越大，反应谱特征周期减小，影响不明显，但反应谱平台值越大。为了定量分析河谷场地对地震动参数的影响，计算得到不同倾角、不同深宽比反应谱平台值修正系数，修正系数为河谷场地反应谱平台值平均值与水平呈层地表反应谱平台值之差与水平呈层地表反应谱平台值之比，见表 3。河谷场地 β 谱平台值为修正系数乘以地表水平呈层 β 谱平台值，不同倾角和深宽比可以采用差值方法获得。

表 3 β 谱平台值修正系数

Tab. 3 Correction coefficients bout platform value of β spectrum

倾角	深宽比		
	0.5	1.0	2.0
30°	5%	15%	20%
45°	10%	20%	23%
60°	15%	25%	25%

4 结论

本文以深厚覆盖层梯形河谷场地为研究对象，建立了 9 个计算模型，采用 OpenSees 有限元程序对深厚河谷地形场地进行数值模拟，研究了不同河谷坡角、深宽比、覆盖层厚度对地表地震动反应谱的影响程度，得到了其地震动相应规律，给出了地表地震动反应谱平台值修正系数。需要说明的是，本文数值模拟中所选用的模型是概化的河谷场地模型，比较简单，是在输入地震动、计算模型、土层层厚、土体特性等给定的情况下得到的， β 谱平台值修正系数有一定的局限性，不能反应真实的河谷场地情况。土体计算参数为经验

参数，没有根据真实的河谷场地进行现场取样试验。因此，本文得到结论是粗浅的，在以后的研究工作中应建立更加精细的河谷场地模型，采用准确的土体动力学参数，系统地建立河谷场地模型，综合分析河谷场地地震动效应，才能给出更为合理科学的河谷场地地震动参数修正系数。

参考文献：

陈清军,张巍,夏江. 2013. 基于 PC 集群的三维河谷场地长周期地震动响应并行计算[J]. 防灾减灾工程学报,33(3):263-268.

金丹丹,陈国兴,董菲蕃. 2014. 多地貌单元复合场地非线性地震效应特征二维分析[J]. 岩土力学,35(6):1818-1825.

李平. 2013. 汶川特大地震震源震害异常研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.

梁建文,严林隽,Vincent W L. 2002a. 圆弧形凹陷地形表面覆盖层对入射平面 P 波的影响[J]. 固体力学学报,23(4):397-411.

梁建文,严林隽,Vincent W L. 2002b. 圆弧形凹陷地形地表覆盖层对入射平面 SV 波的影响[J]. 地震学报,23(4):397-411.

梁建文,严林隽,李军伟,等. 2001. 圆弧形层状沉积河谷场地在平面 P 波入射下动力响应[J]. 岩土力学. 22(2):138-143.

梁建文,张郁山,顾晓鲁,等. 2000. 圆弧形层状沉积河谷场地在平面 SH 波入射下动力响应[J]. 岩土工程学报. 22(4):396-401.

梁建文,张郁山,顾晓鲁,等. 2003. 圆弧形层状凹陷地形对平面 SH 波的散射[J]. 振动工程学报,16(2):158-165.

任叶飞,温瑞智,山中浩明,等. 2013. 运用广义反演法研究汶川地震场地效应[J]. 土木工程学报,46(增刊1):146-151.

宋贞霞,丁海平. 2013. 三维不规则地形河谷场地地震响应分析方法研究[J]. 地震工程与工程振动,3(2):8-15.

王海云. 2011. 渭河盆地中土层场地对地震动的放大作用[J]. 地球物理学报,54(1):137-150.

王伟. 2011. 地震动的山体地形效应[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.

肖文海. 2009. 大型河谷场地地震动特征研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.

赵培培,王振宇,薄景山. 2017. 利用差分进化算法标定设计反应谱[J]. 地震工程与工程振动,37(5):45-50.

Boulanger R W,Chang D,Gulerce U,et al. 2006. Evaluating pile pinning effects on abutments over liquefied ground[M]. California:Special Publication,GSP 145,306-318.

Boulanger R W,Tokimatsu K. 2006. Seismic performance and simulation of pile foundations in liquefied and laterally spreading ground[M]. California:Special Publication,GSP 145.

Rayamajhi D,Ashford S A,Boulanger M,et al. 2016a. Dense granular columns in liquefiable ground. I: Shear reinforcement and cyclic stress ratio reduction[J]. J Geotech Geoenviron Eng,142(7):04016023-1-11.

Rayamajhi D,Boulanger M W,Scott A A,et al. 2016b. Dense granular

- columns in liquefiable ground. I: Effect on deformation [J]. J Geotech Geoenviron Eng, 142(7):04016024.
- Yang Z, Elgamal A, Parra E 2003. A computational model for cyclic mobility and associated shear deformation [J]. J Geotech Geoenviron Eng, 129(12):1119–1127.
- Yang Z, Elgamal A. 2002. Influence of permeability on liquefaction – induced shear deformation [J]. J Eng Mech, 128(7):720–729.
- Yang Z, Lu J, Elgamal A. 2008. OpenSees soil models and solid – fluid fully coupled elements; User's manual [M]. San Diego: Dept of Structural Engineering, Univ of California.
- Yang Z. 2000. Numerical modeling of earthquake site response including dilation and liquefaction [D]. New York: Dept of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Columbia Univ.
- Zana K, Shideh D. 2016. Seismic Performance of Shallow Founded Structures on Liquefiable Ground; Validation of Numerical Simulations Using Centrifuge Experiments [J]. J Geotech Geoenviron Eng, 142(6):04016011.

Study on the Effect of Trapezoidal Valley Site on Adjustment Method of Response Spectrum Platform Value Based on OpenSees

LI Ping^{1,2}, ZHANG Yudong², LI Juwen², GU Junru², ZHU Sheng², LI Yuying²

(1. School of Engineering Consulting & Design, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

(2. Department of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China)

Abstract

Taking trapezoidal valley site as the research object, the OpenSees finite element program which is used widely in earthquake engineering was adopted for simulating the deep valley sites, then the influences of different valley slope angle, depth – to – width ratio, overburden thickness on the surface ground motion response spectra were explored, furthermore the corresponding laws of ground motion about the sites were captured. The results show that the slope angle and depth – to – width ratio have no significant influence on the characteristic period of the response spectrum, but have significant influence on the platform value of the response spectrum. The Tab. of correction coefficient of the platform value of ground motion response spectrum is given by mathematical statistical method.

Keywords: OpensSees; river valley site; ground motion; response spectrum; aseismic design