

文章编号: 1000-8608(2018)04-0407-07

核电厂桥梁结构-地基动力相互作用精细化分析

邹德高^{*1,2}, 隋翊^{1,2}, 周扬^{1,2}, 孔宪京^{1,2}, 刘鑫³, 龚涛³

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 建设工程学部 水利工程学院, 辽宁 大连 116024;

3. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 某核电厂拟建厂内应急通道桥, 这在中国核电领域尚属首次。厂内道桥承担着应急撤离和救援的重要功能, 其地震安全十分重要。分别建立了传统的土弹簧模型(“m法”)和桥梁结构-地基实体单元精细化模型, 研究了地基模型以及地震动输入方法对桥墩柱动弯矩的影响。结果表明: 在运行安全地震动工况下, 土弹簧模型计算的桥墩柱动弯矩比精细化模型小 15%~20%; 当极限安全地震动时, 两者动力响应差距显著增加, 达到 20%~30%。波动输入方法考虑了地基的辐射阻尼和行波效应, 计算的桥墩柱动弯矩比传统的一致输入方法小 24%~34%。因此, 在开展核电厂重要桥梁结构抗震安全评价时, 进行桥梁结构-地基动力相互作用精细化分析是十分必要的。

关键词: 桩土效应; 核安全相关; 桥梁; 精细化模型; 波动输入方法; 地震响应

中图分类号: U442

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201804011

0 引言

桥梁作为交通运输的枢纽工程, 在现代交通中发挥着重要作用, 但在我国核电厂中应用极少。当前国家大力发展战略性新兴产业, 核电站的建设进入了快速发展时期, 有关数据显示^[1]截至 2017 年上半年, 我国已并网发电机组 36 台, 在建 21 台, 计划建设 41 台, 世界范围内在建机组 170 台, 我国占比 24.1%。随着核电产业的蓬勃发展, 核电厂已经开始建设桥梁工程, 如某核电厂为满足 5、6 号机组建设、营运期间日常通路和特殊情况下核电厂应急撤离的需求, 拟修建厂内应急通道桥梁。

由于在核电领域没有为桥梁抗震制定的详细规范与导则^[2], 考虑到核电工程的安全性及重要性, 保证桥梁在强震作用下不倒塌、不产生严重结构损伤, 不需要修复或经简单修复可继续使用, 以使厂内人员在撤离时可尽量不近距离通过事故反应堆, 并尽量避开放射性烟羽的影响^[3], 这就需要更加严格的计算校核。

此外, 岩性地基厂址的逐渐匮乏, 软岩、土层

和覆盖层等地基厂址的建设已无法回避。国内学者在考虑 SSI 效应(即地基-结构相互作用效应)对核电厂建筑物动力响应的影响方面做了大量的研究与贡献^[4-8]。因此, 核电桥梁工程的抗震分析需要更加合理地模拟桥梁结构的三维空间特性、结构与复杂地基的相互作用特性以及地基土体的动力非线性特性等。另外, 目前桥梁地震响应计算中普遍采用一致输入方法(即刚性边界模型施加惯性力), 该方法无法考虑无限域基岩的辐射阻尼和行波效应, 可能会导致计算结果的不合理。由于核电工程抗震的重要性, 采用更加切合实际的方法对其分析是十分必要和迫切的。

本文建立精细化的桥梁结构三维有限元模型, 地基分别采用传统的土弹簧模型(“m 法”)和实体单元精细化模型, 对比两种地基模型时桥梁结构在不同地震动强度下的动力响应结果与规律; 另外, 分别采用传统的地震一致输入方法和地震波动输入方法对桥梁结构-地基动力相互作用进行计算, 对两者的地震响应进行详细的对比分析。

1 计算模型和材料参数

本文参照实际工程,桥梁上部结构采用装配式预应力混凝土 T 梁,单跨 8 片 T 梁,梁高 2.4 m,桥面横坡 2%. T 梁顶板厚 0.25 m(主梁截面如图 1 所示),30 m 一跨,3 跨一联,全桥共 4 联;桥墩采用桩柱式墩,横桥向设 3 根直径 1.6 m 圆柱,柱距 6.5 m;同时桩顶设系梁;桥墩基础采用直径 1.8 m 钻孔灌注桩。

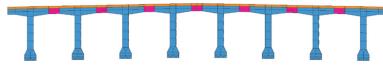


图 1 跨中截面

Fig. 1 Mid-span section

精细化建立桥梁上部结构,图 2 中所示为一跨结构的有限元模型。桩周围土体的刚度按照“*m* 法”计算获得,分别在水平两个方向施加刚度弹簧来模拟桩土相互作用^[9],如图 3 所示,弹簧参数见表 1. 图 4 则为实体单元模拟的地基模型。

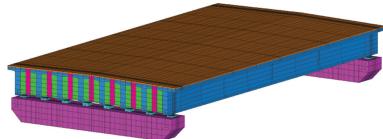


图 2 一跨有限元模型

Fig. 2 One span finite element model

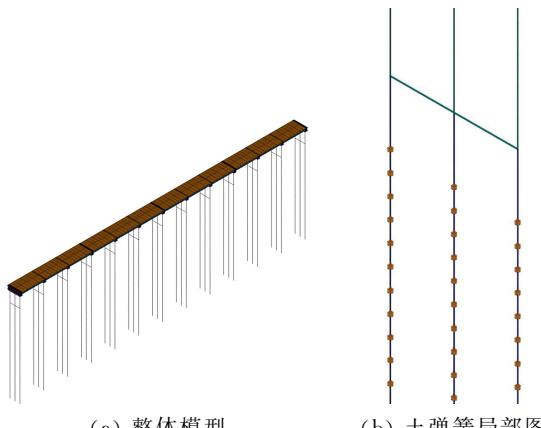


图 3 土弹簧有限元模型

Fig. 3 The soil spring finite element model

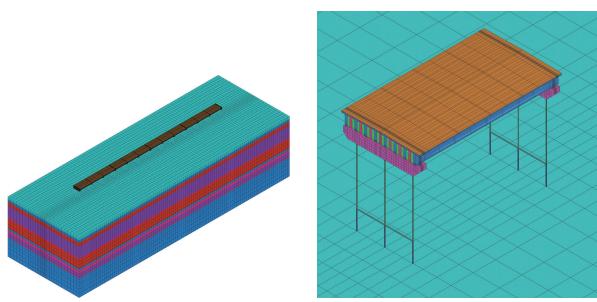
在建立桥梁结构-地基整体模型时,地基在深度方向上取到基岩区域,约 91 m 深。表 2 给出了混凝土材料参数,覆盖土层沿高程分布见表 3。土体的动力本构采用等效线性黏-弹性模型^[10],归一化等效动剪切模量和等效阻尼比与动剪应变幅

的关系^[11]如表 4 所示。

表 1 桩基等效土弹簧参数

Tab. 1 Parameters of equivalent soil spring on the piles

序号	桩计算宽度/m	地基系数 $m/\text{(kN} \cdot \text{m}^{-4}\text{)}$	土层厚度/m	距地面距离/m	弹簧系数/ $\text{(kN} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$
1	2.52	3 000	2	—	—
2	2.52	3 000	2	2	30 240
3	2.52	3 000	2	4	60 480
4	2.52	3 000	2	6	90 720
5	2.52	3 000	2	8	120 960
6	2.52	3 000	2	10	151 200
7	2.52	8 000	2	12	483 840
8	2.52	8 000	2	14	564 480
9	2.52	8 000	2	16	645 120
10	2.52	8 000	2	18	725 760
11	2.52	4 000	2	20	403 200
12	2.52	4 000	2	22	443 520
13	2.52	4 000	2	24	483 840
14	2.52	4 000	2	26	524 160
15	2.52	4 000	2	28	564 480
16	2.52	4 000	2	30	604 800
17	2.52	4 000	2	32	645 120
18	2.52	4 000	2	34	685 440
19	2.52	4 000	2	36	725 760
20	2.52	4 000	2	38	766 080
21	2.52	4 000	2	40	806 400
22	2.52	4 000	2	42	846 720
23	2.52	4 000	2	44	887 040
24	2.52	50 000	2	46	11 592 000
25	2.52	50 000	2	48	12 096 000
26	2.52	10 000	2	50	2 520 000
27	2.52	10 000	2	52	2 620 800
28	2.52	10 000	2	54	2 721 600
29	2.52	10 000	2	56	2 822 400
30	2.52	10 000	2	58	2 923 200
31	2.52	10 000	2	60	3 024 000
32	2.52	10 000	2	62	3 124 800
33	2.52	10 000	2	64	3 225 600
34	2.52	10 000	2	66	3 326 400
35	2.52	10 000	2	68	3 427 200
36	2.52	10 000	2	70	3 528 000
37	2.52	10 000	2	72	3 628 800
38	2.52	10 000	2	74	3 729 600
39	2.52	10 000	2	76	3 830 400
40	2.52	10 000	2	78	3 931 200
41	2.52	30 000	2	80	12 096 000
42	2.52	30 000	2	82	12 398 400
43	2.52	30 000	2	84	12 700 800
44	2.52	30 000	2	86	13 003 200
45	2.52	30 000	2	88	13 305 600
46	2.52	100 000	2	90	45 360 000
47	2.52	100 000	2	92	46 368 000
48	2.52	100 000	2	94	47 376 000



(a) 整体模型

(b) 桥梁和桩基结构局部图

图 4 地基实体单元模型

Fig. 4 The foundation solid element model

表 2 混凝土材料参数

Tab. 2 Parameters of concrete

弹性模量/ Pa	剪切模量/ Pa	泊松比	质量密度/ (kg·m ⁻³)	阻尼 比/%
3.45×10^{10}	1.43×10^{10}	0.2	2 500	5

表 3 地基土特征参数

Tab. 3 Parameters of foundation soil

土层	高程/m	厚度/m	容重/(kN·m ⁻³)
淤泥	-2.9	5.9	16.2
含砂淤泥质土	-8.7	5.7	17.5
粉砂	-15.8	8.5	19.8
淤泥质土	-24.3	8.4	16.5
粉质黏土①	-36.9	16.8	18.8
碎石	-46.7	2.7	22.1
粉质黏土②	-64.1	32.1	19.3
全风化	-84.9	9.5	19.9
基岩	—	—	28.4

每个墩上拥有 8 个支座,每一联的支座分布如图 5 所示,本次计算采用弹性支座模拟,在约束方向上弹性刚度为 1×10^9 kN/m,活动方向上弹性刚度为 1×10^3 kN/m.

表 4 归一化等效动剪切模量和等效阻尼比与动剪应变幅的关系

Tab. 4 The relation of normalized equivalent dynamic shear modulus and equivalent damping ratio with dynamic shear strain amplitude

$\gamma/10^{-4}$	淤泥		细砂(粉砂)		粉质黏土		全风化		碎石	
	G/G_{\max}	λ								
0.01	1.000 0	0.030 0	1.000 0	0.006 0	1.000 0	0.012 0	1.000 0	0.050 0	1.000 0	0.046 1
0.05	0.985 0	0.030 0	0.965 0	0.006 0	0.980 0	0.012 0	0.997 0	0.070 0	0.985 9	0.058 8
0.1	0.970 0	0.035 0	0.935 0	0.010 0	0.970 0	0.015 0	0.994 0	0.082 0	0.972 2	0.062 8
0.5	0.845 0	0.055 0	0.775 0	0.030 0	0.840 0	0.037 0	0.969 0	0.100 0	0.946 2	0.065 3
1	0.730 0	0.077 0	0.660 0	0.045 0	0.730 0	0.056 0	0.940 0	0.118 0	0.910 3	0.071 0
5	0.320 0	0.137 0	0.300 0	0.088 0	0.400 0	0.112 0	0.757 0	0.142 0	0.693 0	0.076 2
10	0.210 0	0.165 0	0.250 0	0.103 0	0.250 0	0.137 0	0.609 0	0.160 0	0.554 2	0.083 3
50	0.085 0	0.220 0	0.105 0	0.124 0	0.070 0	0.170 0	0.238 0	0.195 0	0.274 9	0.105 0
100	0.058 0	0.235 0	0.090 0	0.130 0	0.030 0	0.180 0	0.136 0	0.217 0	0.168 8	0.112 7

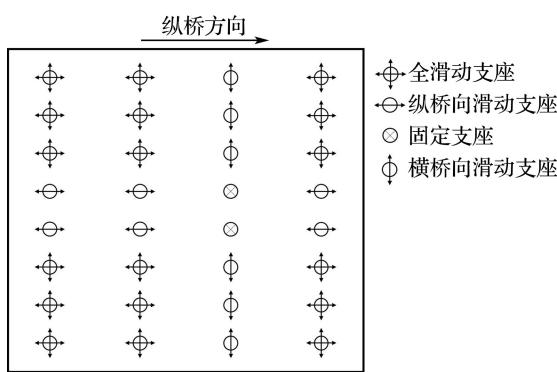


图 5 支座分布

Fig. 5 The distribution of bridge bearing

研究所开发的高性能大型岩土工程非线性有限元计算软件平台——GEODYNA^[12].

2 地震动输入方法

当地震发生时,地震波在地表层传播过程中通过建筑物基础面而引发建筑物振动,传统假定地震动输入沿建筑物基础面是相同的,即所谓的地震动一致输入方法.

黏弹性人工边界^[13]普遍用于解决半无限域空间问题,亦为美国核电规范 ASCE 4-98^[14]中推荐的人工边界之一.本文采用黏弹性人工边界界面单元(图 6),可等效黏弹性人工边界的作用^[15],而且建模简单快捷,适应复杂边界形状.

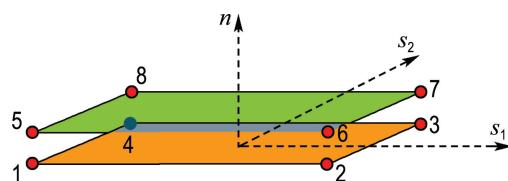


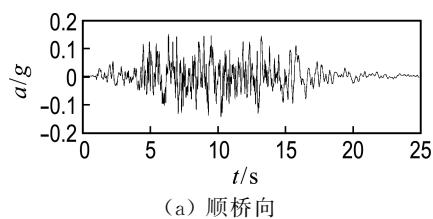
图 6 黏弹性人工边界界面单元

Fig. 6 Viscous-elastic artificial boundary interface element

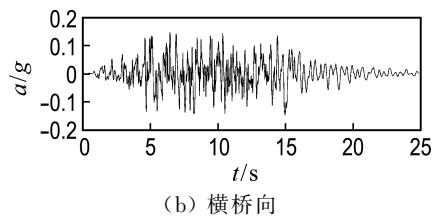
地震波动输入方法采用等效节点荷载来实现^[16],通过模拟截断地基边界处的实际应力状态,来实现地震波动输入方法。

3 地基模型的影响

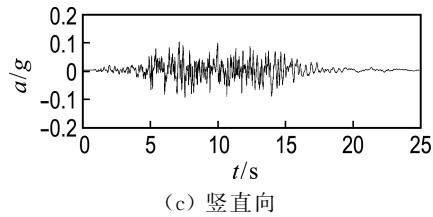
美国 RG1.60 设计反应谱是世界上最早的核电厂抗震设计反应谱之一^[17],国际原子能机构对核电厂抗震设计的规定也参考了 RG1.60 设计反应谱。我国已建核电厂的抗震设计中,大多都考虑了美国 RG1.60 设计反应谱^[18]。本文动力计算采用 RG1.60 谱人工地震波(见图 7),地震动峰值加速度按照我国核电厂抗震设计规范(GB 50267—97)^[2]中 SL-1(运行安全地震动)和 SL-2(极限安全地震动)的规定,分别取 0.075g、0.15g 两种工况。



(a) 顺桥向



(b) 横桥向



(c) 竖直向

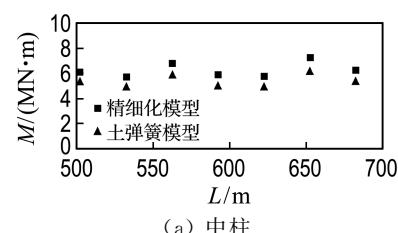
图 7 地震动加速度时程

Fig. 7 The acceleration time history of earthquake

分别计算地基土弹簧模型和地基实体单元精细化模型在两种工况下的动力响应。土弹簧模型

中,土体简化为等价节点弹性支撑,地震动则由嵌岩桩底部固定点三向输入;实体单元精细化模型中,地基截取处施加人工界面单元模拟半无限域空间,地震动采用波动输入方法,进行三向输入。动力计算时间步长采用 0.01 s,其中竖直向地震动峰值取水平向的 2/3。

结果分析时取模型中间两联,关注结构最不利荷载位置,即墩底处弯矩峰值。图 8 为 SL-1 工况(峰值加速度 0.075g)时,每排桩墩底弯矩峰值 M 沿桥长 L 分布规律,图 9 则为 SL-2 工况(峰值加速度 0.15g)结果。

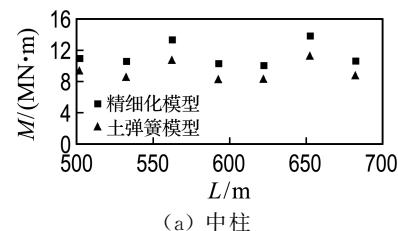


(a) 中柱

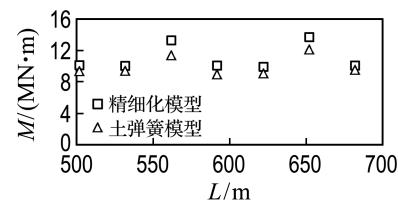


(b) 边柱

图 8 SL-1 工况下墩底弯矩峰值沿桥长分布
Fig. 8 The distribution of extreme bending moment of bottom of pier along the longitudinal direction under SL-1 earthquake



(a) 中柱



(b) 边柱

图 9 SL-2 工况下墩底弯矩峰值沿桥长分布
Fig. 9 The distribution of extreme bending moment of bottom of pier along the longitudinal direction under SL-2 earthquake

图8(SL-1工况)中,中柱与边柱结果分别列出,固定墩弯矩值明显大于非固定墩,中柱与边柱弯矩差别不大,土弹簧模型计算的墩底动弯矩小于精细化模型结果;图9(SL-2工况)中,中柱与边柱墩底弯矩峰值的分布规律与SL-1工况大致相同,其中地基实体单元精细化模型弯矩峰值增加明显。对比两种工况结果,将每一排墩柱墩底弯矩峰值的差值百分比 δ 沿桥长分布情况展示于图10。SL-1地震动输入时,差值在15%~20%,最大值为18%;SL-2地震动输入时,差值在20%~30%,最大值为27%。

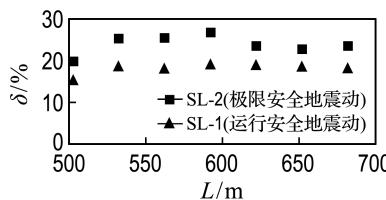


图10 不同工况下墩底弯矩峰值差值百分比沿桥长分布

Fig. 10 The difference percentages of extreme bending moment of bottom of pier along the longitudinal direction under different cases

动力计算中,采用实体单元模拟地基时,可以合理地考虑土体的动力非线性特性,相对于“m法”中m取值,等价线性模型参数均依靠实验或实测数据换算,土体的非线性应力-应变关系模拟更加合理。同时,随着地震动的增强,两种模型的动力结果差别愈发显著。由于在地震过程中,土体模量会随地震动出现明显的衰减过程,上部桥梁结构的变形也会随之放大,导致地基实体单元精细化模型的动内力结果偏大。

4 地震动输入方法的影响

在半无限域中截取出有限计算区域,在截断处设置人工边界是解决半无限空间问题最常用的有限元计算方法,相对于传统的一致输入方法(即刚性边界模型施加惯性力),地震波动输入方法^[19]在桥梁动力计算中应用相对较少。通过地基的三维自由场动力反应,得到包括土层实时的位移、速度、加速度及应力等信息,来确定结构-地基-基岩整体模型人工边界的参数及等效节点荷载。

图11为墩底弯矩峰值沿桥长的分布情况,两种方法计算结果的分布规律基本相同,但一致输

入方法结果明显大于波动输入方法,差值达到24%~34%(见图12)。

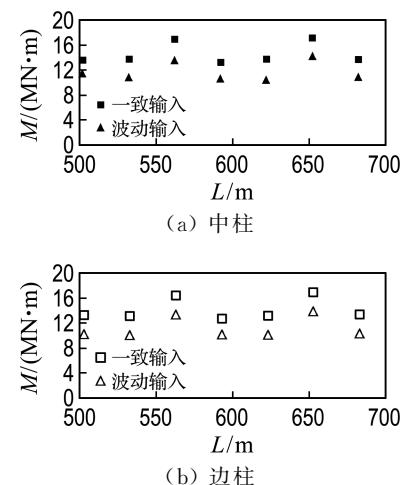


图11 墩底弯矩峰值沿桥长分布

Fig. 11 The distribution of extreme bending moment of bottom of pier along the longitudinal direction

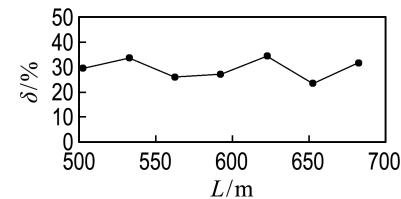


图12 墩底弯矩峰值差值百分比沿桥长分布

Fig. 12 The difference percentages of extreme bending moment of bottom of pier along the longitudinal direction

一致输入方法虽然在一定程度上考虑了结构-地基之间的相互作用,但未考虑无限基岩的辐射阻尼,使其结果较波动输入方法明显偏大。波动输入方法可以合理地反映能量开放的地震动输入机制,计算的墩底动弯矩结果更加可靠。

5 结 论

(1)相比于“m法”中m取值,等价线性模型参数均依靠实验或实测数据换算所得,同时,土弹簧模型无法有效模拟出土体的模量与阻尼随土动剪应变的变化关系。在SL-1地震工况下,土弹簧模型计算的墩底动弯矩比精细化模型小15%~20%;在SL-2地震工况下,随地震动增强,土体的动力非线性特性使两者动力响应差别显著增加,差值在20%~30%。

(2)波动输入方法在计算中考虑了无限基岩的辐射阻尼和行波效应,对地震动的输入模拟更

加合理,从而得到的墩底动弯矩明显小于一致输入方法,差值在 24%~34%.因此,地震动的输入方式对结构的动力响应有着重要影响,对于核安全相关的重要结构,应采用更加合理的地震动输入方法.

(3)进行核电厂中桥梁的抗震分析计算时,在初步设计阶段可采用简化模型进行分析设计,但当需要考虑桥梁结构的极限抗震能力时,建议采用精细化的地基和地震动输入模型进行校核.这对核电厂桥梁结构的抗震裕度和震后功能评价有着重要的借鉴与指导意义.

参考文献:

- [1] IAEA. Nuclear power reactors in the world [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2017.
- [2] 国家地震局. 核电厂抗震设计规范: GB 50267—97 [S]. 北京:中国计划出版社, 1998.
China Earthquake Administration. Code for Seismic Design of Nuclear Power Plants: GB 50267-97 [S]. Beijing: China Planning Press, 1998. (in Chinese).
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 核电厂总平面及运输设计规范: GB/T 50294—2014 [S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design Code for General Plan and Transportation of Nuclear Power Plants: GB/T 50294-2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)
- [4] 潘 蓉,孙 锋,张庆华. 核安全监管中关于构筑物安全的 3 个问题讨论[J]. 核安全, 2013, 12(s1): 81-87.
PAN Rong, SUN Feng, ZHANG Qinghua. Discussion on 3 issues related to structure safety in nuclear safety regulation [J]. **Nuclear Safety**, 2013, 12(s1):81-87. (in Chinese)
- [5] 侯春林,李小军,潘 蓉,等. 地震动持时对核岛结构设计地基场地非线性地震响应影响分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(10):9-12,21.
HOU Chunlin, LI Xiaojun, PAN Rong, et al. Influence analysis of ground motion duration on nonlinear seismic response of nuclear island design foundation [J]. **Industrial Construction**, 2016, 46(10):9-12, 21. (in Chinese)
- [6] 朱秀云,潘 蓉,李建波. 考虑 SSI 效应的核电站厂房楼层反应谱对比分析[J]. 核技术, 2013, 36(4): 50-57.
ZHU Xiuyun, PAN Rong, LI Jianbo. FRS comparative analysis of the nuclear power plant considering SSI effect [J]. **Nuclear Techniques**, 2013, 36(4):50-57. (in Chinese)
- [7] 邹德高,隋 翊,周晨光,等. 深厚覆盖层上核岛厂房的动力响应研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(10): 1-5, 27.
ZOU Degao, SUI Yi, ZHOU Chenguang, et al. Study of dynamic response of nuclear island building on deep overburden layer [J]. **Industrial Construction**, 2016, 46(10):1-5,27. (in Chinese)
- [8] 李建波,王继东,朱秀云. 基于 ANSYS 的核电成层覆盖土场地地震响应分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11):129-132.
LI Jianbo, WANG Jidong, ZHU Xiuyun. Seismic response analysis of layered soil foundation for nuclear power plant based on ANSYS [J]. **Water Resources and Power**, 2014, 32(11):129-132. (in Chinese)
- [9] 重庆交通科研设计院. 公路桥梁抗震设计细则: JTGT B02-01—2008 [S]. 北京:人民交通出版社, 2008.
Chongqing Communication Research & Design Institute. Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges: JTGT B02-01-2008 [S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese).
- [10] 孔宪京,邹德高. 紫坪铺面板堆石坝震害分析与数值模拟[M]. 北京:科学出版社, 2014.
KONG Xianjing, ZOU Degao. **The Damage Analysis and Numerical Simulation of Zipingpu Concrete-Faced Rockfill Dam** [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [11] 中国地震局. 工程场地地震安全性评价工作规范: DB 001—94 [S]. 北京:地震出版社, 1994:1-50.
China Earthquake Administration. Code for Seismic Safety Evaluation of Engineering Site: DB 001-94 [S]. Beijing: Seismological Press, 1994: 1-50. (in Chinese)
- [12] 邹德高,孔宪京. Geotechnical dynamic nonlinear analysis—GEODYNA 使用说明[R]. 大连:大连理工大学土木水利学院工程抗震研究所, 2003.
ZOU Degao, KONG Xianjing. Geotechnical dynamic nonlinear analysis-GEODYNA manual [R]. Dalian: Institute of Earthquake Engineering, School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [13] LYSMER J, KUHLEMAYER R L. Finite dynamic model for infinite media [J]. **Journal of the**

- Engineering Mechanics Division**, 1969, **95**(4):859-878.
- [14] ASCE. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary: ASCE 4-98 [S]. New York: American Society of Civil Engineering, 2000.
- [15] 张树茂,周晨光,邹德高,等. 地震波倾斜入射对土石坝动力反应的影响[J]. 水电能源科学, 2014, **32**(8):72-75, 119.
ZHANG Shumao, ZHOU Chenguang, ZOU Degao, et al. Influence of oblique incidence of seismic waves on dynamic response to rock-fill dam [J]. **Water Resources and Power**, 2014, **32**(8):72-75, 119. (in Chinese)
- [16] 周晨光. 高土石坝地震波动输入机制研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009.
ZHOU Chenguang. Research on the mechanism of seismic wave input about high rockfill dam [D].
- Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [17] BETBEDER-MATIBET J. **Seismic Engineering** [M]. London: Wiley-ISTE, 2008;900-906.
- [18] 潘蓉. 核设施的设计地震反应谱[J]. 原子能科学技术, 2008, **42**(s2):622-629.
PAN Rong. Design seismic response spectrum used in design of nuclear facilities [J]. **Atomic Energy Science and Technology**, 2008, **42**(s2):622-629. (in Chinese)
- [19] 周晨光,孔宪京,邹德高,等. 地震波动输入方法对高土石坝地震反应影响研究[J]. 大连理工大学学报, 2016, **56**(4):382-389.
ZHOU Chenguang, KONG Xianjing, ZOU Degao, et al. Study of influence of earthquake wave motion input method on seismic response of high earth-rock dam [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2016, **56**(4):382-389. (in Chinese)

Refined dynamic interaction analysis of soil-bridge structure of nuclear power plants

ZOU Degao^{*1,2}, SUI Yi^{1,2}, ZHOU Yang^{1,2}, KONG Xianjing^{1,2}, LIU Xin³, GONG Tao³

- (1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. China Nuclear Power Design Co., Ltd. (Shenzhen), Shenzhen 518000, China)

Abstract: An emergency bridge is planned to build in a nuclear power plant, which is the first time in China's nuclear sector. The bridge of nuclear power plant has important function of emergency evacuation and rescue, so its seismic security is very important. The traditional soil springs model by *m*-method and soil-bridge structure solid element refined model are established respectively, and the influence of foundation model and earthquake motion input method on dynamic bending moment of bridge pier is researched. The results indicate that dynamic bending moment of soil springs model is 15%-20% lower than that of refined model under operation-safe ground motion. Meanwhile, significant difference of 20%-30% on dynamic bending moment is observed under ultimate-safe ground motion. Wave input method considers radiation damping and traveling wave effect of the foundation, and the obtained dynamic bending moment is 24%-34% lower than that calculated by the uniform excitation method. Therefore, it is necessary to take refined dynamic interaction analysis of soil-bridge structure in seismic safety evaluation of important bridge structure in nuclear power plant.

Key words: pile-soil effect; nuclear safety related; bridge; refined model; wave input method; seismic response