

文章编号: 1006-4710(2012)02-0168-05

大型群桩桩土动力相互作用分析方法研究

郝鹏, 刘云贺, 张育乐

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对大型群桩与土体动力相互作用的高度复杂性, 基于经典变分原理, 利用拉氏乘子法和罚函数法建立了反映桩体与土体相对运动和其实几何尺寸的非线性动力相互作用的分析模型, 并编制了相应的分析程序。以南水北调中线穿黄 U 形渡槽工程为研究对象, 利用本文的模型研究了常用的 M 法模型在渡槽结构中应用的适用性。结果表明, 在静载作用下, 两种方法给出的渡槽上部结构的位移和应力基本一致, 渡槽下部桩体结构的分析结果略有差异, 但相差不超过 20%。在 earthquake 荷载下, M 法的分析结果是偏小的, 尤其是对渡槽上部结构的影响更大。

关键词: 桩土; 动力相互作用; 非线性有限元; M 法

中图分类号: TU435 文献标志码: A

The Study of Soil-pile Interaction of the Large-Scale Group-Piles Foundations

HAO Peng, LIU Yunhe, ZHANG Yule

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: The soil-pile dynamic interaction mechanism of the large-scale group-piles foundations is of high complexity. Base on the classical variation principle, Las multiplier method and the penalty function method are used to establish the non-linear dynamic interaction analysis model of actual geometric dimensions which can reflect the relative displacement between the pile body and soil body, and the corresponding analytical program is made. With the U-shaped flume engineering in the middle line of the South-to-North water diversion project passing across the Yellow River as the study object, this paper deals with corresponding applicability of the frequently-used M-method in the aqueduct by the model in this paper. The results indicate the under the static loads, the displacement and stress of the superstructure of the aqueduct are basically ,but as to the substructure of the aqueduct ,the results of the M-method are more or less 20% than the results obtained by the non-linear FEM. However, under the earthquake loads, the analysis results by using the non-linear FEM are larger than the M-method, so that effect upon the upper structure of aqueduct is larger than the substructure of aqueduct.

Key words: soil-pile; dynamic interaction; non-linear finite element; M-method

大型群桩动力荷载作用下的桩土相互作用问题,一直是工程界和学术界研究的热点和难点问题^[1-3]。由于土体性质的复杂性以及桩土物理特性的巨大差异,在 earthquake 荷载作用下,桩与土之间可能会出现脱离、相对滑动和共同运动等时变的特性,表现出强非线性状态,使得研究极为困难,至今也没有理想的解决办法,规范中采用由土体属性确定的常系数弹簧作为土体对桩的约束作用,这就是传统的 M 法^[4-5]。M 法虽然简单易行,但其仅考虑了土的约

束作用,回避了桩土间的相互作用的真实行为。若要反映桩与土的真实特性,必须要处理好桩与土的“内边界”条件,这方面已有的研究主要以 Goodman 类型的接触单元^[2,6-7]采用得最多,但这种单元模型存在接触刚度难以确定等问题。

本文基于经典变分原理,借助拉氏乘子法和罚函数法建立了利用约束方程描述桩土内界面脱离、滑移和接触等不连续特性的桩土非线性动力相互作用的分析模型,解决了 Goodman 类型的接触单元确

收稿日期: 2011-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179154)。

作者简介: 郝鹏(1960-),男,陕西凤翔人,教授级高工,博士生,研究方向为流体动力学及水工结构抗震。E-mail: msdih-phym@163.com。刘云贺(1968-),男,辽宁凌源人,教授,研究方向为水工结构抗震。E-mail: liuyhe@xaut.edu.cn。

定接触刚度问题的困难,并编制了相应的程序。以南水北调中线穿黄 U 形渡槽工程为研究对象,探讨了桩土界面接触非线性模型和 M 法模型分析结果的差异,其成果对桩土相互作用问题的研究和实际工程应用具有一定的参考和借鉴价值。

1 桩土相互作用的非线性动力模型

桩-土体接触内界面在动力荷载下的特性,在每一时刻都随系统运动状态的变化而不断改变,其任一时刻的运动性质可分为脱离状态、滑移状态及接触状态三种情况。计及上述运动状态,基于经典变分原理,利用拉氏乘子法和罚函数法可以给出桩土体非线性动力相互作用的广义变分方程:

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (\Pi_1 - T - \psi + Q_c + Q_{sl} + Q_d) dt = 0 \quad (1)$$

式中, $\Pi_1 = E - W$, 其中 E 、 W 分别为接触体通常的变形能和外荷载所做的功; T 、 ψ 分别为接触体的动能和内阻尼耗散能。 Q_c 、 Q_{sl} 和 Q_d 分别为接触区、滑移区和分离区的内界面功,其表达形式分别如下:

对于接触区,

$$Q_c = \int_c \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{g} ds \quad (2)$$

其中, $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_n \ \lambda_s \ \lambda_t]^T$ 为拉氏乘子,变分后可知,其物理意义为接触内力; \mathbf{g} 为相应接触点的间隙矢量。

对于滑移区,

$$Q_{sl} = \int_{sl} \boldsymbol{\lambda}_n^T \mathbf{g}_n ds + \int_{sl} (\boldsymbol{\lambda}_{st}^T - \mathbf{f}_{st}^T) \mathbf{g}_{st} ds \quad (3)$$

其中,第一项中 $\boldsymbol{\lambda}_n$ 为拉氏乘子;第二项中 $\mathbf{g}_{st} = [g_s \ g_t]^T$ 为拉氏乘子。 $\boldsymbol{\lambda}_{st} = [\lambda_s \ \lambda_t]^T$, $\mathbf{f}_{st} = [F_{st} \cos\theta \ F_{st} \sin\theta]^T$, 其中 F_{st} 为界面的抗滑强度, θ 为滑动方向角。

对于分离区,

$$Q_d = \int_d \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{g} ds + \frac{1}{2} \int_d \alpha (-\mathbf{g}_n)^T (-\mathbf{g}_n) u (-\mathbf{g}_n) ds \quad (4)$$

其中, $\mathbf{g} = [g_n \ g_s \ g_t]^T$ 为拉氏乘子; α 为罚因子 ($\alpha > 0$)

$$u(-\mathbf{g}_n) = \begin{cases} 0, & -\mathbf{g}_n \leq 0 \\ 1, & -\mathbf{g}_n > 0 \end{cases} \quad (5)$$

为阶跃函数。

对方程(1)变分求导,可得桩土相互作用的有限元基本方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{II}^C & \mathbf{K}_{IU}^C \\ \mathbf{K}_{JI}^C & \mathbf{K}_{JJ}^C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \boldsymbol{\lambda}_J \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{F}_J \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为系统的质量、阻尼和刚度矩阵, $\ddot{\mathbf{u}}_1$ 、 $\dot{\mathbf{u}}_1$ 、 \mathbf{u}_1 分别为系统的加速度、速度和位移列向量, \mathbf{K}_{IJ}^C 为界面接触刚度矩阵子块, $\boldsymbol{\lambda}_J$ 为接触内力的向量; \mathbf{F}_J 为由接触约束条件方程导出的等效节点力向量。

2 工程实例分析

2.1 模型简介

本文以南水北调中线穿黄弧柏嘴工程的 U 形渡槽结构方案为研究对象。该工程全长 3.5 km, 单跨 50 m, 共 70 跨, 基础采用两排共 6 根直径 2.2 m 的灌注摩擦桩。两个独立的槽体布置在一个支撑结构上。单槽设计过流 125 m³/s, 槽体外型尺寸高 7.15 m, 宽 9.0 m, 底板厚 0.8 m, 侧墙腹板厚 0.3 m。槽顶每 5.0 m 布置横梁断面 0.5 m × 0.5 m 的横向支撑。每个槽体端部与支撑结构间设置两个盆式橡胶支座。支撑结构采用三个直径 2.80 m、高 9.0 ~ 11.0 m 的槽墩和墩帽构成。河床主要为砂粘土交替层, 其物理特性参见文献[8]。槽体建材采用 C60 混凝土, 弹性模量为 36.0 GPa; 墩帽、槽墩采用 C40 混凝土, 弹性模量为 32.5 GPa, 承台及桩基均采用 C30 混凝土, 弹性模量为 30.0 GPa; 以上混凝土泊松比均为: $\mu = 0.167$, 密度均为: $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ 。

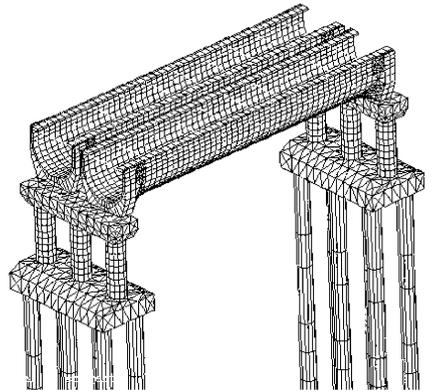


图1 渡槽有限元模型

Fig. 1 The FEM of aqueduct

由于渡槽结构每跨的独立特点,且相邻跨的墩高基本相同,为了简化计算,在合理模拟相邻跨的影响下,取某一典型跨作为研究对象,其有限元模型如图1所示,跨中截面如图2所示,计算典型段墩高 9.0 m, 桩长 77 m。

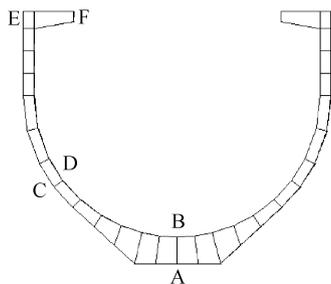


图2 渡槽跨中截面图

Fig.2 Key points at the middle section of span

2.2 研究工况及荷载

静力分析:作用荷载有结构重力、预应力、风荷载、槽内水荷载(有水工况)、河道流水压力、人群(汽车)等荷载。

动力分析:在上述静力荷载基础上作用地震荷载,槽内水体采用附加质量法处理。地震作用按三方向输入,地震荷载采用场地反应谱拟合的人工波,波形如图3所示,在两个水平方向输入的加速度幅值依据该场地的地震危险性分析结果取为 $0.1304g$,竖向输入加速度幅值按水工建筑物抗震规范取水平方向的 $2/3$ 。

需说明的是动力分析是在静力分析的基础上进行的,对于非线性问题的分析不能采用叠加法,也就

是静力计算的结果不能与动力分析结果直接相加。本文进行动力分析时,前5秒按一定比例关系缓慢地施加静力荷载,完成静力荷载作用后,再作用地震荷载,达到静力荷载和动力荷载施加的目的。

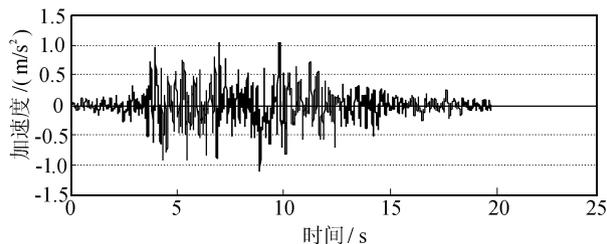


图3 输入加速度曲线

Fig.3 The curve of input Acceleration

3 结果分析

对上述模型的桩土相互作用影响分别采用M法和本文所建立的非线性有限元法进行了详尽的静、动力数值模拟分析,得出了渡槽结构桩、墩和槽体等各部位不同工况下的位移、应力等众多响应结果。篇幅所限,下面仅给出部分代表性的成果进行分析。图4、5分别给出槽内有水工况下桩体在静荷载作用下的竖向应力和位移结果。

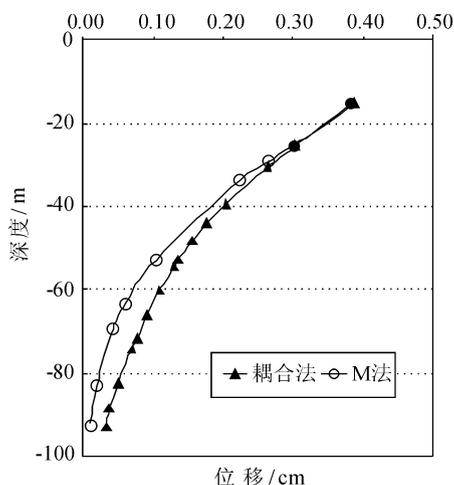


图4 桩的竖向位移

Fig.4 The vertical displacement of pile

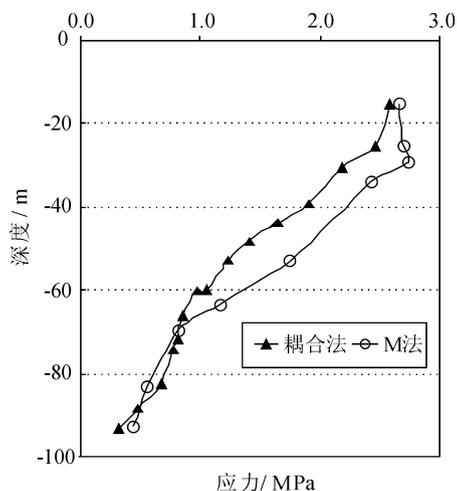


图5 桩的竖向应力

Fig.5 The vertical stress of pile

由图4、5可以看出,桩的竖向位移M法和非线性有限元耦合法的分析结果上基本一致,沿桩身的变化趋势也是相同的,只是在桩底的竖向位移值稍有差别,但最大相差仅为 0.3 cm ,差别是非常小的。桩的竖向应力,M法的分析结果比非线性有限元法分析结果略大,但沿桩身的变化趋势基本相同。两种方法所得的结果最大偏差不超过 20% 。

表1给出渡槽上部结构的各部位最大静力位移。可以看出,桩基的两种模拟方法给出的渡槽上部结构的最大静位移基本上是一致的,各部位分析结果的偏差均不超过 10% 。

图6~9给出槽内无水工况桩土相互作用两种方法跨中和支座截面最大主应力图(单位为MPa)。由图可见,各个截面上的应力等值线的变化趋势相同,量值也非常接近。

表1 最大静位移
Tab.1 The maximal static displacement

工况	部位	横槽向/mm		竖槽向/mm		顺槽向/mm		位移幅值/mm	
		FEM	M法	FEM	M法	FEM	M法	FEM	M法
槽有水	槽体跨中	1.88	1.94	21.19	-21.22	0.31	0.34	19.90	20.91
	槽体支座	1.30	1.47	12.56	-12.40	-4.48	-4.48	14.23	14.25
	中墩	0.29	0.38	-6.40	-6.28	-1.11	-0.88	6.51	5.96
	边墩	0.65	0.53	-6.31	-6.24	-1.03	-0.87	5.54	5.95
槽无水	槽体跨中	1.71	1.69	-5.10	-4.27	0.74	0.72	4.21	4.30
	槽体支座	1.51	1.28	-8.71	-7.25	8.53	6.53	9.50	7.80
	中墩	0.68	0.39	-4.06	-4.45	-2.20	-2.17	4.41	4.40
	边墩	0.59	0.48	-3.99	-4.41	-1.95	-2.12	4.55	4.36

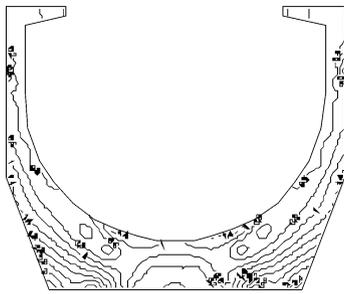


图6 有限元法支座截面最大主应力
Fig.6 The maximal main stress of FEM at the bearing section

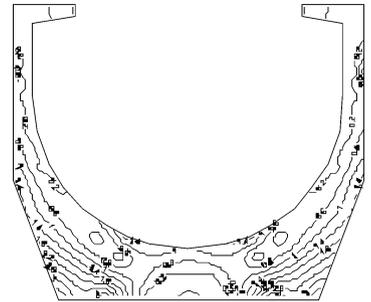


图7 M法支座截面最大主应力
Fig.7 The maximal main stress of M-Method at the bearing section

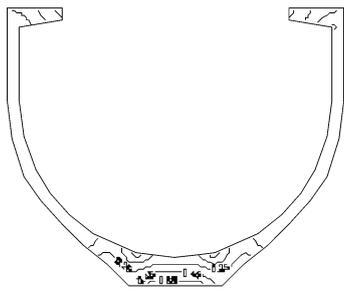


图8 有限元法跨中截面最大主应力
Fig.8 The maximal main stress of FEM at the middle section of span

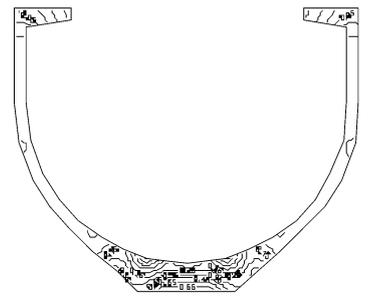


图9 M法跨中最大截面主应力
Fig.9 The maximal main stress of M-Method at the middle section of span

由以上静力分析结果可见,采用M法和非线性有限元耦合模拟同一结构的桩基础,桩本身的应力和位移略有一定的差异,但是对于渡槽上部结构的位移和应力的影响都比较小。从桩和上部结构总的来看,各响应量的差值都不是很大。因此,在静力情况下采用M法对渡槽桩基础进行模拟可以满足要求的。

表2给出了地震荷载下有水工况渡槽结构关键部位两种方法的正应力值,表中A、B、C、D、E、F位

置参见图2所示,A1、B1、C1、D1、E1、F1分别支座截面上与位置A、B、C、D、E、F相对应的位置,A2、B2分别为边墩中截面顺水流方向前后顶点,A3、B3分别为中墩中截面顺水流方向前后顶点。由表中数据可见,不论是有水还是无水工况,地震荷载作用下,M法的计算结果偏小,与非线性有限元的应力分析结果最大相差1倍多,但两种方法变化的规律,还是具有一定的可比性的。

表2 槽内有水动应力最大值
Tab.2 The Maximal Dynamic stresses under containing water at the aqueduct

节点	M 法			有限元法		
	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_z/MPa	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_z/MPa
A	0.032	0.012	0.693	0.047	0.018	1.248
B	0.035	0.009	0.434	0.600	0.009	0.918
C	0.098	0.380	1.047	0.185	0.375	1.373
D	0.138	0.429	1.029	0.248	0.723	1.857
E	0.035	0.066	0.972	0.360	0.048	1.134
F	0.080	0.048	2.252	1.410	0.075	2.555
A1	0.368	0.045	0.155	0.527	0.116	0.305
B1	0.165	0.017	0.093	0.456	0.017	0.152
C1	0.407	0.461	0.719	0.627	0.777	0.815
D1	0.419	0.207	0.120	0.773	0.375	0.081
E1	0.047	0.059	0.077	0.092	0.074	0.117
F1	0.047	0.014	0.290	0.077	0.018	0.302
A2	0.180	5.790	0.488	0.315	6.525	1.184
B2	0.197	5.516	0.558	0.533	11.775	0.551
A3	0.134	5.298	0.399	0.225	12.482	0.648
B3	0.137	5.375	0.369	0.635	3.252	0.675

总之,在地震荷载作用下,M 法和非线性有限元法所给出的分析结果是相差比较大的,其规律刚好与静力分析结果相反,桩基础的差值要小于上部结构的差值,也就是地震荷载下对桩土的不同处理对上部结构影响比较大。另外由于目前工程中对渡槽结构的抗震评估,主要还是以简单的 M 法为主,这个特例给出的 M 法计算结果偏小的结论,对于实际工程的评估应慎重进行。

4 结 论

1) 在静力荷载作用下,桩与土相互作用的不同处理方法,对桩本身的影响要比对上部结构的影响大,但其差别并不十分显著,最大不超过 20%;对于工程精度要求不是很高,桩根数比较多难以分析计算时,可采用比较简单的 M 法模拟桩基础,以提高计算效率。

2) 在地震荷载下,渡槽各关键部位响应值的变化趋势两种方法是基本一致的,只是在数值上有一定区别,非线性有限元的结果要比 M 法的结果大;另外对桩土的不同处理方法,对桩基础的影响要比对上部结构影响要小,也就是地震荷载作用下,其规律刚好与静力分析结果相反,对上部结构影响要比对桩本身的影响大;另外,采用 M 法动力分析结果偏小的结论,应在实际工程正确抗震安全评估中引起注意。

参考文献:

[1] 汪优,刘建华,王星华,等. 软土地层桥梁群桩基础桩土共同作用性状的非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2012,33(3):945-951.

Wang You, Liu Jianhua, Wang Xinghua, et al. Nonlinear finite element analysis of pile-soil interaction of bridge pile group foundation in soft soil stratum[J]. Chinese Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3):945-951.

[2] 郑明新. 川藏公路某滑坡抗滑桩工程效果的有限元后评价[J]. 岩土力学, 2009, 30(6):1782-1788.

Zheng Mingxin. Finite element post evaluation of landslide control using anti-slide pile along Sichuan-Tibet Highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6):1782-1788.

[3] 李正农,张盼盼,朱旭鹏,等. 考虑桩-土动力相互作用的渡槽结构水平地震响应分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(12):137-143.

Li Zhengnong, Zhang Panpan, Zhu Xupeng, et al. Horizontal seismic response analysis of aqueduct with pier-soil dynamic interaction [J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2010, 43(12):137-143.

[4] 公路桥涵地基与基础设计规范(JTG D63—2007)[S]. 中华人民共和国交通运输部, 2007:28-38.

Code for Design of Ground Base and Foundation of Highway Bridges and Culverts (JTG D63—2007) [S]. Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2007:28-38.

[5] 高大钊. 桩基础的设计方法与施工技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.

[6] Goodman L E, Taylor R L, Berkke T L. A model for the mechanics of jointed rock [J]. ASCE, 1968, 94(SM3):637-659.

[7] Desai C S, Zaman M M, Lightner J G, et al. Thin-layer element for interfaces and joints [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1984, 8(1):19-43.

[8] 陈厚群,张伯艳,刘云贺. 南水北调中线穿黄渡槽抗震安全评估报告[C]//中国水利水电科学研究院, 2002:3-25.

Chen Houqun, Zhang Boyan, Liu Yunhe. Seismic safety report of the aqueduct in middle route of South-North water transfer across the Yellow River [C] //China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2002:3-25.