桩基导管架平台的非线性分析

许 滨 申仲翰

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘 要 本文对渤海八号桩基导管架平台进行了非线性倒塌的分析, 分别给出了导管架平台八倍固支计算模型和考虑桩土非线性计算模型的结构倒塌极限载荷及倒塌破坏过程。

关键词 非线性分析 导管架平台 极限载荷 平台倒塌

1 前言

随着计算机的发展, 海洋工程结构的设计不再局限于线性分析, 而逐步将非线性分析引入到设计过程中。同时在平台结构进行安全性评估中也需对平台结构进行非线性倒塌分析。因此, 海洋导管架平台结构的非线性分析, 在海洋工程中起到越来越大的作用。

在非线性分析中, 分析者若描述的载荷增量太小, 导致求解时间太长, 若载荷增量太大, 会导致方程在平衡迭代过程中不收敛。通常在导管架平台结构非线性分析过程中(求解最大承载载荷), 开始给一些较大的载荷步, 当结构中开始有构件达到屈服应力点时应适当地减小载荷步, 随着结构中构件屈服数目的增多, 逐步减小载荷增量。

海洋导管架平台结构为一个钢结构框架, 它是由主腿、水平构件、斜撑构件、甲板和桩基等构件组成, 为一个超静定结构。在环境荷载作用下, 主腿斜撑构件首先达到屈服点, 载荷继续增加, 屈服杆件数量不断增大最终导致整座平台倒塌[1]。针对这些特点, 在对导管架平台结构进行非线性倒塌分析中, 往往采用把主腿和水面以下的斜撑构件作为非线性单元, 其它所有构件采用线性单元的计算模型来计算。

本文对渤海八号桩基导管架平台进行了非线性倒塌分析, 分析给出了导管架平台八倍固支计算模型和考虑桩土非线性计算模型的结构倒塌极限载荷及倒塌破坏过程。

2 计算方法

在非线性分析中, 我们用平衡方程增量解法来计算有限元系统的响应, 所采用的增量求解方案是一种带线性搜索的BFGS 矩阵修正法, 它可以完成一般的几何和材料非线性有限元分析[2]。

2.1 增量有限元平衡方程:

$$ {}^{t}\bar{K}\,\bar{U} = {}^{t+\Delta t}\bar{R} - {}^{t}\bar{F} \tag{1} $$

其中 ${}^{t}\bar{K}$ —— 在时间 t 的切向刚度阵

$\bar{U}$ —— 从 t 时刻在 $t+\Delta t$ 时刻的节点位移矢量增量, 即 $\bar{U} = {}^{t+\Delta t}\bar{U} - {}^{t}\bar{U}$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$^{t+\Delta t}\bar{R}$ ——在 $t+\Delta t$ 时刻, 施加的节点外载荷矢量

$^{t}\bar{F}$ ——相应于 t 时刻单元应力的节点力矢量

2.2　平衡方程的求解迭代过程:

在时刻 $t+\Delta t$, 平衡迭代使用 BFGS (Broyden-Fletcher-Goldforb-Shanno) 迭代方法, 其迭代过程为:

$$^{t}\bar{K}^{*}\Delta\bar{U}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\bar{R}^{(i-1)} - {}^{t+\Delta t}\bar{F}^{(i-1)} \tag{2}$$

$$^{t+\Delta t}\bar{U}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\bar{U}^{(i-1)} + \beta\Delta\bar{U}^{(i)} \tag{3}$$

其中

$^{t}\bar{K}^{*}$ ——修正的刚度阵

β——在 $\Delta\bar{U}^{(i)}$ 方向上由线性搜索所确定的加速因子

2.3　收敛准则:

$$\Delta\bar{U}^{(t)}({}^{t+\Delta t}\bar{R}^{(i)} - {}^{t+\Delta t}\bar{F}^{(i)}) \leq \mathrm{STOL}.\ \Delta\bar{U}^{(t)}({}^{t+\Delta t}\bar{R}^{(i-1)} - {}^{t+\Delta t}\bar{F}^{(i-1)}) \tag{4}$$

其中

STOL ——线性搜索收敛的允许值 ($\leq$1.0)

2.4　修正的刚度阵计算:

$$({}^{t+\Delta t}\bar{K}^{-1})^{(i)} = \bar{A}^{(i)t} - ({}^{t+\Delta t}\bar{K}^{-1})^{(i-1)}\bar{A}^{(i)} \tag{5}$$

其中 $\bar{A}^{(i)}$ 为 $n\times n$ 矩阵, 为:

$$\bar{A}^{(i)} = \bar{I} + \bar{V}^{(i)}\bar{W}^{(i)t}$$

矢量 $\bar{V}^{(i)}$ 和 $\bar{W}^{(i)}$ 从已知的节点力和位移计算得到, 即:

$$\bar{V}^{(i)} = -\left[\frac{\bar{\delta}^{(i)t}\bar{v}^{(i)}}{\bar{\delta}^{(i)t}\ {}^{t+\Delta t}\bar{K}^{(i-1)}\bar{\delta}^{(i)}}\right]^{1/2}{}^{t+\Delta t}\bar{K}^{(i-1)}\bar{\delta}^{(i)} - \bar{v}^{(i)}$$

$$\bar{W}^{(i)} = \frac{\bar{\delta}^{(i)}}{\bar{\delta}^{(i)t}\bar{v}^{(i)}}$$

式中:

$$\bar{\delta}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\bar{U}^{(i)} - {}^{t+\Delta t}\bar{U}^{(i-1)}$$

$$\bar{v}^{(i)} = ({}^{t+\Delta t}\bar{R}^{(i-1)} - {}^{t+\Delta t}\bar{F}^{(i-1)}) - ({}^{t+\Delta t}\bar{R}^{(i)} - {}^{t+\Delta t}\bar{F}^{(i)})$$

方程 (5) 是正定和对称矩阵

3　计算模型

海洋导管架平台结构为一个超静定结构, 它是由主腿、水平构件、斜撑构件、甲板和桩基等构件组成, 在环境载荷作用下, 力的传递主要通过斜撑构件。当桩腿和斜撑构件都达到屈服点时, 水平构件及水面以上构件仍然处于线性阶段[3]。因此, 在计算模型中我们将结构中主要受力构件斜撑和桩腿选定为非线性单元, 其它所有构件为线性单元。与整个平台结构都使用非线性单元相比较, 可以节省大量的计算时间, 就结构极限载荷而言不会产生任何误差。

结构的最大承载能力 (载荷) 的定义是: 就理论上而言, 当结构逐步加载到达某一定值后, 若再增加一个非常小的载荷, 结构将产生较大的位移, 此时称为结构失稳, 承载达到极

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

限。从计算分析上而言,若程序中计算方法是采用载荷控制,则当载荷——位移曲线呈水平状况时,结构承载已经达到极限;若程序中计算方法是采用既可控制载荷又可以控制位移,开始阶段采用载荷控制,当载荷——位移曲线达到某一个值后,采用控制位移,曲线将随着位移增加载荷下降,说明此时结构承载能力已经开始下降,结构的极限承载力为曲线中最高点的载荷[4],本文中采用前者计算方法。

计算模型中坐标系如图 1 所示,原点取在泥线的平台结构中点处。

3.1 导管架平台桩腿固支模型

渤海八号导管架平台计算模型简化为泥线以下按 8 倍主腿直径固支(图 1),整个导管架的有限元划分为 391 个节点,927 个单元,其中梁单元 540 个,杆单元 387 个。甲板部分简化为一个刚性框架,导管架管节点考虑为刚性联接。作用在导管架平台上的载荷有导管架自重、导管架附属物、甲板死载,设备重量、甲板活载、海水对管导架的浮力、甲板 X 方向风载(风力和风力矩)、波浪载、冰载和流载荷。

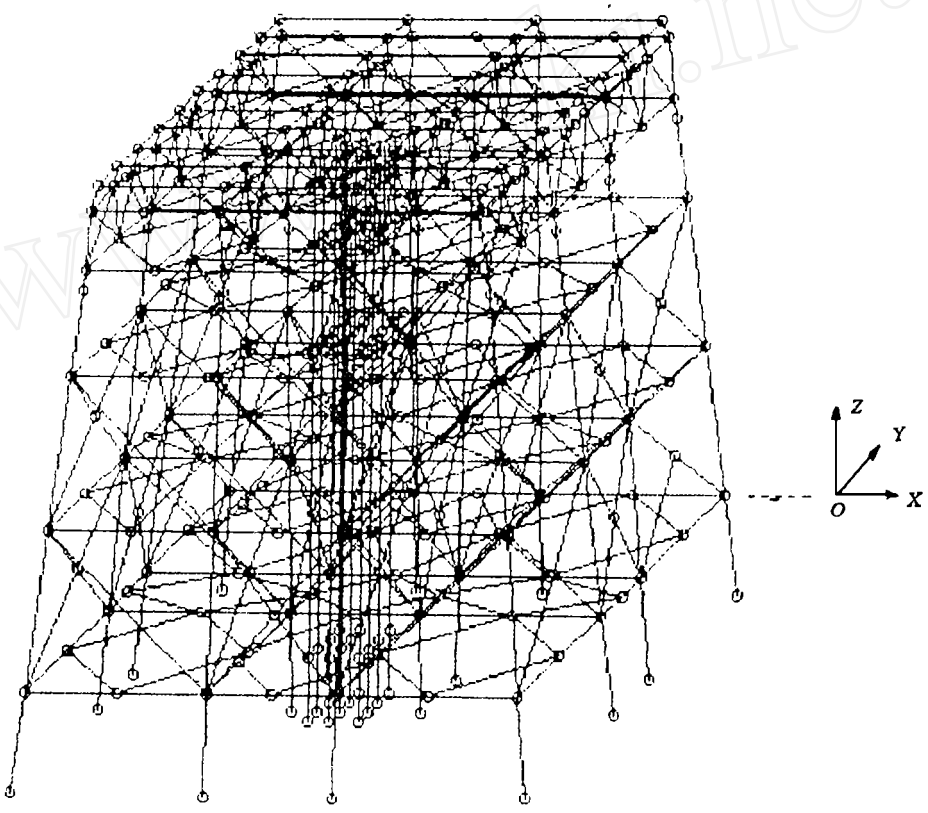

图 1

在非线性分析中,既考虑了材料非线性(理想弹塑性)又考虑了几何非线性(包括大位移和大转动的影响,但计算中假定为小应变)。导管架 1、4、7、10 立片的 48 个斜撑杆作为非线性单元,结构其他单元为线性单元,根据导管架结构特性,在非线性分析过程中,开始时给些

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较大的载荷步, 当接近屈服载荷时适当减小载荷步, 非线性单元开始屈服点在 $6F_0$ (F_0 为初始环境载荷), 当载荷步到达 $9.45F_0$ 时, 整个结构承载能力达到最大(图 2), 若计算模型中把 1、4、7、10 立片的 48 个斜撑杆和泥线以下。 16 个主腿部分作为非线性单元, 结构其他单元为线性单元, 逐步加载计算, 当载荷等于 $3F_0$ 时, 16 个主腿中的 3 个腿开始屈服, 继续加载至到载荷等于 $7.35F_0$ 时, 结构承载能力达到最大, 此时所有 16 个主腿全部屈服, 而且有 10 个斜撑杆也同时屈服(图 2)。 若只对 16 个主腿作非线性分析, 结构其他所有单元均为线性单元, 得到结构的最大承载力为 $9.0F_0$ (图 2)。图 2 中横坐标为甲板某点的位移(但并不是最大位移点), 纵坐标为计算载荷与初始环境载荷之比 F/F_0

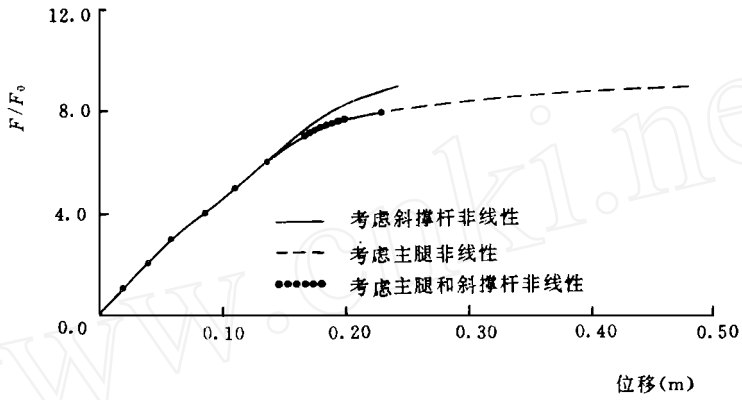

图 2

3.2　导管架平台桩土非线性模型

计算模型泥线以上结构同图 1 所示相同, 所不同的是泥线以下不按 8 倍主腿直径固支, 而是考虑桩土非线性, 用非线性弹簧来模拟土对桩的作用。$P-Y$ 曲线采用渤海检测公司提供的渤海海域数据(表 1)。 导管架桩腿在泥线以下长 39m, 根据 $P-Y$ 曲线数据, 泥线以下共划分为 10 层不同的土层, 每层在 X 和 Y 方向各用非线性弹簧来模拟桩土非线性(图 3)。计算了以下三种不同的非线性结构模型: (1) 16 个主腿和 1、4、7、10 立片上的 48 个斜撑杆作为非线性单元, 结构其他单元为线性单元。在载荷 $5F_0$ (F_0 为初始环境载荷) 处有些单元开始达到屈服, 继续加载直到 $7.7F_0$ 结构倒塌破坏(图 4)。(2) 48 个斜撑杆作为非线性单元。结构其他单元为线性, 结构最大承载载荷为 $9.0F_0$ (图 4)。 (3) 主腿作为非线性单元, 其他单元为线性, 最大承载载荷为 $8.75F_0$ (图 4)。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 P—Y 数据

	深 度(m)								
	0.762	1.676	2.591	4.115	5.944	7.620	9.144	11.735	14.783	19.660
Y_1^*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P_1^{**}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Y_2	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203
P_2	88	193	298	236	693	876	1050	5306	6795	15822
Y_3	0.432	0.432	0.432	0.381	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0.432
P_3	173	385	595	298	1376	1751	2100	9259	13482	18070
Y_4	0.635	0.635	0.635	0.762	0.635	0.635	0.635	0.635	0.635	0.635
P_4	172	578	945	375	2648	2626	3152	11238	17766	27018
Y_5	0.838	0.838	0.838	1.524	0.838	0.838	0.838	0.838	0.838	0.838
P_5	184	655	1190	473	2528	3502	4308	12894	20396	35900
Y_6	1.067	1.067	1.067	3.048	1.067	1.067	1.067	1.067	1.067	1.067
P_6	194	688	1364	602	2814	4285	5253	14360	22702	39960
Y_7	1.27	1.27	1.27	6.096	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
P_7	203	717	1421	751	3072	4677	6304	15673	24777	43614
Y_8	1.473	1.473	1.473	7.62	1.473	1.473	1.473	1.473	1.473	1.473
P_8	210	744	1470	809	3306	5036	7022	16878	26680	46964
Y_9	1.70	1.70	1.70	9.525	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
P_9	217	768	1514	872	3526	5368	7492	17995	28447	50073
Y_{10}	1.905	1.905	1.905	11.43	1.905	1.905	1.905	1.905	1.905	1.905
P_{10}	222	789	1554	926	3734	5680	7928	19042	30102	52985
Y_{11}	2.108	2.108	2.108	13.34	2.108	2.108	2.108	2.108	2.108	2.108
P_{11}	228	809	1590	975	3926	5976	8340	20030	31662	55334
Y_{12}	2.337	2.337	2.337	15.24	2.337	2.337	2.337	2.337	2.337	2.337
P_{12}	233	826	1624	1079	4110	6255	8728	20966	33145	58343
Y_{13}	2.54	2.54	2.54	19.05	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54
P_{13}	238	844	1745	1098	4285	6522	9102	21860	34562	60832
Y_{14}	3.607	3.607	3.607	22.86	3.607	3.607	3.607	3.607	3.607	3.607
P_{14}	261	924	1810	1166	5140	7827	10922	26234	41469	72997
Y_{15}	4.648	4.648	4.648	60.96	4.648	4.648	4.648	4.648	4.648	4.648
P_{15}	284	1006	1964	957	6000	9128	12742	30605	48382	35136
Y_{16}	5.715	5.715	5.715	114.3	5.715	5.715	5.715	5.715	5.715	5.715
P_{16}	308	1087	2116	665	6818	10085	14562	34978	55293	97331
Y_{17}	152.4	152.4	152.4	152.4	152.4	152.4	152.4	152.4	152.4	152.4
P_{17}	308	1087	2116	665	6818	10085	14562	34978	55293	97331

P^{**}——N/cm， Y^*——cm

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

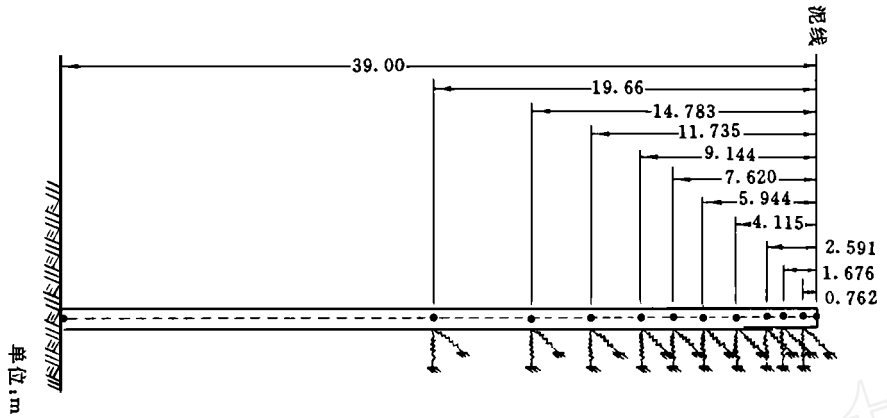

图 3　桩土模型

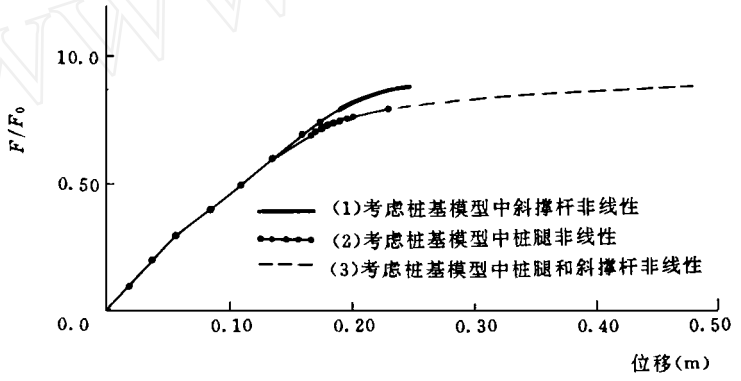

图 4

4　结论与讨论

(1) 在导管架 8 倍主腿直径固支模型中, 若单独考虑斜杆非线性或主腿非线性, 其最大承载值前者比后者稍微大些, 但若把两种单元同时考虑非线性, 则最大承载载荷要比两种单元单独考虑时小, 其原因在于主腿单元和斜杆单元屈服在整个结构中交替屈服。

(2) 在平台结构考虑桩土非线性的模型中, 三种不同的非线性结构模型的最大承载载荷

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

排列顺序同固支模型相同。

(3) 既考虑主腿非线性又考虑斜杆非线性, 在固支模型中所得到的最大承载力要比桩土非线性模型所得到的最大承载力小, 这样在导管架平台整体安全性评估中, 采用固支模型得到的安全度值较保守, 有利于工程设计部门。

(4) 本文结构针对桩基导管架平台结构具有一定的普遍性, 所不同的是结构承受环境载荷方向不同, 各个桩腿和斜撑杆达到屈服点的先后次序不同, 即结构的倒塌模式不同。若对一座平台而言, 只要环境载荷作用方向一定, 则固支模型求得的极限载荷总是比桩土非线性模型求得的极限载荷要小。

参考文献

1 许滨, "海洋导管架结构损伤失效模式的研究", 力学所报告, 1994. 5

2 BATHE, "On the automatic solution of nonlinear finite element equations", Computers & Structures, Vol 17, No. 5-6, pp. 871-879, 1983

3 许滨, 申仲翰, 海洋导管架平台的极限强度分析, 海洋工程, Vol 12, No. 3, pp 8～16, 1994

4 申仲翰, 许滨, 赵强, 吕聪, 钢结构海上平台整体安全性评估方法研究, 力学所报告, 1995. 6

THE NONLINEAR ANALYSIS OF THE PILE-FOUNDATION JACKET PLATFORM

Xu Bin Shen Zhonghan

(*Institute of Mechanics, China Academy of Sciences Beijing* 100080)

Abstract In this paper, the nonlinear collapse of the BOHAI-8 pile foundation jacket platform has been analyzed. The ultimate load and collapse procedure of two computational models of the structure are given. One is the model of fixed support which is eight times as long as the pile leg diameter and the other is the model considering the pile-soil nonlineariy.

Key words nonlinear analysis, jacket platform, ultimate load, platform collapse

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net