

指导性文件

GUIDANCE NOTES

GD09-2023



中 国 船 级 社

深水导管架结构分析 技术指南

2023

2023 年 4 月 1 日生效

北 京

目 录

第 1 章 通 则	1
第 1 节 一般规定	1
第 2 节 引用文件	1
第 3 节 定义和缩写	1
第 2 章 结构建模	4
第 1 节 一般规定	4
第 2 节 依据的图纸资料	5
第 3 节 平台的结构模拟	6
第 4 节 平台的荷载模拟	7
第 5 节 建模命名规则	8
第 3 章 静力分析	9
第 1 节 一般规定	9
第 2 节 基本工况	9
第 3 节 组合工况	10
第 4 节 结构校核	10
第 4 章 动力响应分析	12
第 1 节 一般规定	12
第 2 节 动力放大系数	12
第 3 节 响应的最可能极大值	13
第 4 节 惯性荷载分布	14
第 5 章 地震分析	15
第 1 节 一般规定	15
第 2 节 桩基线性化	15
第 3 节 模态分析	15
第 4 节 地震响应分析	16
第 5 节 结构校核	16
第 6 章 疲劳分析	18
第 1 节 一般规定	18

第 2 节 桩基线性化.....	18
第 3 节 模态分析.....	19
第 4 节 波浪响应分析.....	19
第 5 节 疲劳寿命计算.....	19
第 7 章 装船分析	22
第 1 节 一般规定.....	22
第 2 节 导管架强度分析.....	22
第 8 章 运输分析	23
第 1 节 一般规定.....	23
第 2 节 运输船总纵强度分析.....	23
第 3 节 运动响应分析.....	23
第 4 节 导管架结构分析.....	24
第 9 章 下水与扶正分析	25
第 1 节 一般规定.....	25
第 2 节 下水动力分析.....	25
第 3 节 下水结构分析.....	26
第 4 节 扶正分析.....	26
第 5 节 扶正结构分析.....	27
第 10 章 附加分析	28
第 1 节 坐底稳定性及防沉板结构分析.....	28
第 2 节 节点加强环.....	29
第 3 节 裙桩套筒及连接结构局部强度分析.....	36
第 4 节 涡激振动.....	36
第 5 节 波浪砰击.....	39
附录 A 结构模型的节点编号和杆件分组规则	41
第 1 节 节点编号的设置规则.....	41
第 2 节 杆件和板单元分组编号的设置规则.....	41

第1章 通则

第1节 一般规定

1.1.1 一般要求

1.1.1.1 本指南是中国船级社（以下简称“CCS”）关于深水导管架结构分析的指导性文件。

1.1.1.2 本指南中深水导管架是指水深大于 120 m 或自振周期大于 3 s 的导管架。对于此类深水导管架结构，在位分析中应重点关注复杂管节点强度、加强环能力、内波影响（适用时）、动力响应和疲劳效应；在运输分析中，若驳船和导管架之间的协调变形对结构强度的影响不可忽略，应予以考虑。

1.1.1.3 本指南提供的推荐方法是非强制性的，但选择 CCS 提供相关技术服务应接受本指南的相关要求，其它采纳本指南的行为应自行承担所有相关风险。

1.1.2 适用范围

1.1.2.1 本指南适用于采用工作应力法进行设计的深水导管架结构建模、在位分析和安装分析。

1.1.2.2 本指南不包括为平台设备加载所建的上部组块结构的技术要求。

1.1.2.3 深水导管架所需开展的倒塌分析可依据 CCS《固定式导管架结构可靠性分析及应用指南》（2015）第 5 章的具体要求。

第2节 引用文件

1.2.1 引用的法规、规范及指南

1.2.1.1 本指南主要参考下列最新版本的法规、规范及标准：

- （1）中国国家经贸委《海上固定平台安全规则》；
- （2）SY/T 10030《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法--工作应力设计法》；
- （3）CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估技术指南》；
- （4）CCS《海洋工程结构设计和评估环境条件应用指南》；
- （5）CCS《固定式导管架结构可靠性分析及应用指南》；
- （6）CCS《大型海工结构物运输和浮托安装分析指南》。

第3节 定义和缩写

1.3.1 术语和定义

1.3.1.1 暴露分级

通过考虑人命安全和失效后果所确定的结构分类等级。

1.3.1.2 飞溅区

由于受潮汐、风和波浪的影响，平台干湿交替的区域。

1.3.1.3 在位分析

对平台在使用期间承受功能载荷和环境载荷联合作用所进行的结构强度分析,本指南涉及的在位分析包括静力分析、动力响应分析、地震分析、疲劳分析和倒塌分析。

1.3.1.4 安装分析

对平台在海上安装过程所进行的静态或动态分析,本指南涉及的安装分析包括装船结构分析、运输分析、下水与扶正分析以及坐底稳性分析。

1.3.1.5 名义应力

根据杆件截面特性和杆件受力得到的应力。通过整体受力分析确定杆端所受的力和力矩,需考虑端部加厚段或锥段影响。

1.3.1.6 设计使用寿命

结构设计时预计不失去使用功能的有效使用时间,期间需要有针对性、有计划的维护,但不需要大量的维修工作。

1.3.1.7 强度

材料在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力。

1.3.1.8 屈服强度

金属材料发生屈服现象时的屈服极限,亦即抵抗微量塑性变形的应力。对于无明显屈服的金属材料,规定以产生 0.2%残余变形的应力值为其屈服极限,称为条件屈服极限或屈服强度。

1.3.1.9 抗拉强度

表征材料最大均匀塑性变形的抗力,拉伸试样在承受最大拉应力之前,变形是均匀一致的,但超出之后,金属开始出现缩颈现象,即产生集中变形;对于没有(或很小)均匀塑性变形的脆性材料,它反映了材料的断裂抗力。

1.3.1.10 应力集中系数

峰值应力和不考虑应力集中时的应力(即名义应力)的比值,它反映了应力集中程度。

1.3.1.11 海况

在特定时间内,用以表征固定的随机过程的海洋波浪条件。

1.3.1.12 有义波高

某一海况条件下波高的统计值。有义波高最初的定义是指稳定海况条件下,三分之一最大上跨零波高的平均值。在波浪数据采集系统中,通常定义为 $4\sqrt{m_0}$ 或 4σ ,其中 m_0 为波浪谱的零阶距, σ 为测量时段内(一般大致为30分钟)波面高度时程的标准差。

1.3.1.13 S-N 曲线

疲劳循环次数(N)与疲劳应力范围(S)之间的关系曲线。

1.3.1.14 主要结构

对保持导管架结构整体完整性具有重要影响的关键构件,如主腿、斜拉筋、水平拉筋等构件。

1.3.1.15 附属结构

其损坏不会对导管架结构整体完整性造成弱化的构件,如隔水套管导向框架、走道支撑等。

1.3.1.16 结构响应的最可能极值

对应响应峰值概率密度函数中超越概率约63%的峰值,即3小时的海况中1/1000峰值。

1.3.1.17 主腿

导管架主立面上各主轴上的大型管型杆件,承受并传递平台重力荷载和环境荷载的主要受力构件。

1.3.1.18 立柱

上部组块主立面各主轴上的大型竖向管型杆件，承受并传递平台功能荷载的主要受力构件。

1.3.1.19 拉筋

导管架水平层内或里面内斜向布置的用于加强结构稳定性的管型构件，通常有 K 型拉筋和 X 型拉筋等。

1.3.1.20 斜撑

上部组块的立面内斜向布置的，用于连接立柱和甲板主梁的管型构件。

1.3.1.21 主要构件

对保持导管架结构整体完整性具有重要影响的关键构件，如主腿、撑杆等构件。

1.3.1.22 次要构件

其损坏不会对导管架结构整体完整性造成弱化的构件，如隔水套管导向框架、走道支撑等。

1.3.2 缩写

1.3.2.1 本指南中采用的缩写词的解释如下：

DAF 动力放大系数 (Dynamic Amplification Factor)

MPME 最可能极大值 (Most Probable Maximum Extreme)

RAO 响应幅算子 (Response Amplitude Operator)

第 2 章 结构建模

第 1 节 一般规定

- 2.1.1 一般要求
- 2.1.1.1 应采用经认可的通用工程软件建立深水导管架的结构模型。
- 2.1.1.2 结构模型应采用直角坐标系，Z 轴向上为正，X、Y 为水平轴，Y 轴与结构北一致，X 轴的方向按右手法则确定，坐标原点选在海图水深基准面上。
- 2.1.1.3 结构模型应采用公制单位制。
- 2.1.1.4 结构模型应能反映平台的质量、阻尼和刚度等重要参数和特点，并能反映结构和基础的相互作用。
- 2.1.1.5 平台质量应包括平台主要结构自重、平台附属结构重量、上部设备重量、活荷载重量、海生物质量、附连水质量等。
- 2.1.1.6 对于通过灌浆方式进行连接的桩腿结构，应按 SY/T 10030《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法--工作应力设计法》第 10.4 节的要求对其构造和强度进行校核。

- 2.1.2 构件模拟
- 2.1.2.1 结构模型应充分体现深水导管架的构造型式、刚度、强度的真实特点，对于非规则截面的构件，如下水桁架等，可采用相同截面模量的等效截面进行代替。
- 2.1.2.2 结构模型应考虑飞溅区内构件的腐蚀影响，腐蚀增量应由业主提供，未提供时在位分析可按 0.3 mm/年取值，疲劳分析可取一半的腐蚀增量。
- 2.1.2.3 结构模型的节点编号和杆件组号应能反映杆件位置和分类等信息，详见第 5 节。
- 2.1.2.4 对于承受轴向荷载作用的杆件，包括主腿、立柱、斜撑、拉筋等，应根据两端的约束情况修正有效长度 L_y ， L_z 。 L_y ， L_z 修正值为杆件约束端之间的长度乘上表 2.1.2.4 的折减系数 K 。

折减系数 K		表 2.1.2.4
结构部位	系数 K	
主腿或立柱	1.0	
斜撑	0.8	
K 型拉筋	0.8	
X 型拉筋	0.9	

注：对于 K 型拉筋和 X 型拉筋，如果节点在面外没有支撑，则构成节点的构件至少有一对受拉。K 型拉筋的原始长度取主腿表面至节点中心线的长度，X 型拉筋的原始长度取构成节点的较长杆段的长度。

2.1.2.5 主要构件和次要构件的最大长细比应不超过表 2.1.2.5 的规定值。

构件最大长细比			表 2.1.2.5
杆件类型	受压杆件	受拉杆件	
主要构件	120	200	
次要构件	120	240	

- 2.1.2.6 管状主要构件的径厚比宜介于 20 和 80 之间，如大于 60，则应按 SY/T 10030-2018《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法--工作应力设计法》第 6.2.2 节的要求，对构件的局部屈曲能力进行评估。
- 2.1.2.7 下水桁架非节点处的杆件径厚比不应超过 120，且当超过 60 时要设置合适的

加强环以阻止发生局部屈曲。

2.1.3 节点模拟

2.1.3.1 若节点是由多个撑杆与同一弦杆组成的简单节点，应对撑杆设置偏移，以保证相关撑杆满足最小间隙的要求。

2.1.3.2 如弦杆需设置加厚段，其范围应至少延伸至撑杆外缘 305 mm 或弦杆直径的 1/4，取两者较大值。

2.1.3.3 如撑杆端部需设置加厚段或采用特种钢材时，其长度应不小于撑杆直径或 600 mm，取两者的较大值。

2.1.3.4 计算节点构造能力时，如果撑杆设置了加厚段，可用撑杆普通段的有效能力进行校核，而非加厚段的有效能力。如撑杆加厚段连接有其它撑杆（如 2.1.3.5 所述情况），不应使用撑杆普通段有效能力校核节点构造能力。

2.1.3.5 对由于面内撑杆空间布置的限制，需采用两根撑杆先组成一个节点再与弦杆相连而形成的非典型节点，应对其局部强度进行校核以表明其具有足够的节点能力。

2.1.4 荷载模拟

2.1.4.1 结构模型应根据不同的分析类型，考虑结构自重、设备荷载、活荷载等功能荷载和环境荷载，并进行组合，具体组合原则见相关分析的章节。

2.1.4.2 结构模型应考虑海生物对结构荷载的影响，包括对平台整体重量、环境荷载、杆件粗糙度等方面的影响。

2.1.4.3 不同桩腿数的导管架，沿各个方向的海流阻挡系数可参照表 2.1.4.3 的规定。

海流阻挡系数 表 2.1.4.3

导管架结构型式	不同方向的系数		
	端面	对角线	侧面
4 腿	0.80	0.85	0.80
6 腿	0.75	0.85	0.80
8 腿	0.70	0.85	0.80

2.1.4.4 波浪运动系数可按作业工况 1.0，极端工况 0.95 进行考虑。

2.1.4.5 水动力系数，即拖曳力系数 C_d 和惯性力系数 C_m 可按表 2.1.4.5 考虑。

水动力系数 C_d ， C_m 表 2.1.4.5

分析类型	构件类型	C_d	C_m
静力/地震分析	光滑构件	0.65	1.6
	粗糙构件	1.05	1.2
疲劳分析	光滑构件	0.50	2.0
	粗糙构件	0.80	2.0

2.1.4.6 隔水套管的遮蔽效应可参照 SY/T 10030《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法--工作应力设计法》中图 4 的规定。

第 2 节 依据的图纸资料

2.2.1 一般要求

2.2.1.1 应依据设计基础报告、规格书、设计图纸和重控报告等基础资料开展深水导管架结构的建模工作，以保证结构模型能真实反映结构的刚度、质量、阻尼、荷载等情况。

2.2.2 设计基础报告

2.2.2.1 设计基础报告是开展深水导管架结构分析的重要依据，应在结构建模前予以提供。

2.2.2.2 设计基础报告应包含平台所处海域的环境和地震参数，包括水深、潮位、风浪流参数、地震参数、桩土数据等。

2.2.2.3 设计基础报告应包括上部组块的基本信息，如主尺度，甲板高程、重量重心等信息。

2.2.2.4 设计基础报告中应包括建造、运输、安装的相关信息，如装船方式、运输船舶、浮吊和打桩设备、辅助扶正方式、就位方式等。

2.2.3 规格书

2.2.3.1 结构设计规格书中明确应符合的规范和标准应予以满足。

2.2.3.2 结构模型中的设计荷载、工况组合、容许应力放大系数等应与结构设计规格书一致。

2.2.3.3 结构模型中的构件尺寸规格、屈服强度，弹性模量等参数应与材料规格书一致。

2.2.3.4 对具有外形控制、打磨要求等特殊处理的管节点，其局部强度和疲劳寿命的计算应考虑焊接检验规格书的相关要求。

2.2.3.5 装船分析、拖航分析中结构模型的调整、绑扎构件的模拟、强迫位移工况和拖拉工况的设定应与装船规格书和拖航规格书一致。

2.2.4 设计图纸和重控报告

2.2.4.1 结构模型应能全面反映设计图纸所表达的结构特点，依据的图纸主要包括：

- (1) 平台总体布置图；
- (2) 导管架主立面结构图；
- (3) 导管架下水桁架结构图；
- (4) 导管架水平层结构图；
- (5) 隔水套管结构图；
- (6) 钢桩结构图；
- (7) 上部组块结构图；
- (8) 上部组块甲板荷载；
- (9) 导管架附属结构图，包括立管/支撑结构图、泵护管/支撑结构图、靠船件结构图、登艇平台结构图、防沉板结构图、带缆走道结构图、梯子和栏杆结构图、牺牲阳极布置图等。

2.2.4.2 导管架分析模型的结构自重和附属结构重量应与导管架的重控报告保持一致，上部组块施加的荷载应与组块重控报告（服役阶段）一致或采用导管架组块设计不可超越重量重心数据（设计阶段）。

第3节 平台的结构模拟

2.3.1 导管架主要结构

2.3.1.1 导管架主要结构应全部在计算模型中进行模拟，主要包括导管架主立面结构图、水平层结构图和下水桁架图所涉及的主腿、水平撑、斜拉筋、水平拉筋等。

2.3.1.2 导管架裙桩与桩腿结构局部连接的刚度应预先通过局部有限元分析确定，通过修改模拟局部连接的构件截面属性和弹性模量，使其具有实际相当的刚度。

2.3.1.3 采用同心双层管构件模拟导管架裙桩与钢桩的灌浆时,需注意环形空间内浆的重量可能导致主结构重量与重控报告的偏差,建模时应予以注意。

2.3.1.4 导管架主桩或裙桩的底部端点一般可设置在泥面下 1 m 处。

2.3.1.5 导管架主结构的主要节点,如主腿与水平撑交点、水平撑与水平拉筋交点、斜拉筋交点等应设置成质量凝聚点,模态分析时将根据保留的自由度形成质量阵。

2.3.1.6 对于卧式建造的导管架,应注意安装分析结构模型的杆件有效长度 L_Y 、 L_Z 与在位分析结构模型的区别。

2.3.2 桩基

2.3.2.1 导管架桩基的作用应根据 $T-Z$ 、 $Q-Z$ 、 $P-Y$ 土壤数据进行模拟。

2.3.2.2 桩土相互作用文件中应包含钢桩结构图所体现的分段及对应的截面尺寸信息,并根据实际情况考虑端部土塞面积。

2.3.2.3 当钢桩间距小于 8 倍桩径时,应考虑群桩效应对桩基刚度和承载能力的影响。

2.3.2.4 桩基冲刷会影响钢桩的强度及其承载能力,其影响可通过忽略基础冲刷层的桩土作用予以考虑。

2.3.2.5 应通过承载能力曲线确定桩基的最大抗拉能力和最大抗拔能力。

2.3.3 导管架附属结构

2.3.3.1 导管架在位分析模型中一般包含服役期间长期存在的附属结构,如隔水套管、立管、泵护管、靠船件、防沉板等结构,以捕获波流荷载和浮力的作用。

2.3.3.2 导管架安装分析模型中除了含有在位分析所包含的附属结构外,还需考虑吊具、绑扎件、索具平台、临时辅助结构等。

2.3.3.3 隔水套管与其导向的连接单元应根据实际情况进行自由度释放,隔水套管与土的相互作用宜根据 $T-Z$ 、 $Q-Z$ 、 $P-Y$ 曲线进行模拟。

2.3.4 上部组块

2.3.4.1 上部组块的主梁、主腿、主斜撑等主结构应全部在计算模型中进行模拟,以真实反映平台的整体刚度。

2.3.4.2 上部组块的主要节点,如主梁交叉处、主梁与立柱交叉处、主梁与斜撑交叉处的节点应设置成质量凝聚点,模态分析时将根据保留的自由度形成质量阵。

第4节 平台的荷载模拟

2.4.1 结构和设备荷载

2.4.1.1 深水导管架结构分析,应至少考虑极端高、极端低、作业高、作业低四个水位下的固定荷载,可通过模型所模拟的主结构,设置不同的水深后由计算程序自动获取。

2.4.1.2 在结构模型中进行模拟的导管架附属结构,建议将其密度修正为零,其自重通过杆件荷载或节点荷载的方式施加,以便与导管架重控报告进行分项对比,其浮力可由模型自动获取。

2.4.1.3 导管架在位分析中未模拟的附属结构,应通过杆件荷载或节点荷载的方式施加至合理位置,并考虑其浮力的大小。

2.4.1.4 模态分析时应将未模拟的附属结构的浮力转化成附连水质量进行考虑。

2.4.1.5 隔水套管内部钻杆和泥浆的重量会影响平台模态分析时的整体重量,应通过修

改隔水套管的密度考虑该部分重量。

2.4.1.6 上部组块主结构的密度建议修改为零，其结构重量通过杆件荷载或节点荷载的方式施加。

2.4.1.7 上部组块的附属结构，如火炬臂、吊机立柱、生活楼、井架等，如未在结构模型中模拟，应通过杆件荷载或节点荷载的方式进行考虑。

2.4.1.8 上部组块的设备荷载宜按专业分类进行施加，重量、重心与组块的重控报告保持一致，对于重量较大的大型功能模块应准确模拟其重量、重心或支点反力，以使上部组块荷载的传力路径及分配到导管架结构（尤其是导管架顶部杆件）的荷载符合实际情况。

2.4.1.9 上部组块的主轴顶点应设置力偶来调整重心位置，各层甲板的重量应通过荷载系数进行调整，以保证上部组块的总重量、重心范围与设计基础报告的要求保持一致。

2.4.2 环境荷载

2.4.2.1 平台风荷载的计算应采用平均海平面以上 10 m 处的 1 分钟最大持续风速。

2.4.2.2 导管架风荷载应根据模型中所模拟构件的截面面积、受风面积、风速等参数进行计算，未模拟的附属结构的受风面积应予以考虑。

2.4.2.3 结构模型中未模拟的附属结构，如灌浆管线，带缆走道、隔水套管导向等，会产生额外的波流荷载，应通过修正主结构的 C_d 和 C_m ，或设置波流面积的方式考虑。对于阳极块和外部静水压溃环，可在总体波流荷载设置固定系数，考虑额外的波浪载荷，一般取 5%~10%。

2.4.2.4 计算波浪力时应考虑流对波的多普勒效应，采用表观波周期。

2.4.2.5 应根据表观波周期、波高和水深情况，按 SY/T 10030-2018《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法--工作应力设计法》中图 3 选取合适阶的流函数或 Stokes 五阶波理论来计算二维规则波浪运动。

2.4.3 其他荷载

2.4.3.1 处于地震活跃带的深水导管架平台需要考虑地震荷载的作用，具体方法和过程见本指南第 5 章。

2.4.3.2 深水导管架由于结构柔性较大，应详细分析波浪动力响应的影响，具体方法和过程见本指南第 4 章。

2.4.3.3 深水导管架的装船、运输、下水和扶正过程中会受到拖拉荷载、强迫位移、船舶运动惯性荷载等作用，具体方法和过程见本指南第 7、8 和 9 章。

2.4.4 荷载组合

2.4.4.1 组合荷载工况应考虑所有可能的最不利的荷载组合。

第 5 节 建模命名规则

2.5.1 一般要求

2.5.1.1 节点编号可按本指南附录 A 第 1 节的规定进行设置。

2.5.1.2 杆件的分组编号可按本指南附录 A 第 2 节的规定进行设置。

第3章 静力分析

第1节 一般规定

3.1.1 一般要求

3.1.1.1 应采用经认可的通用工程软件进行深水导管架的静力分析。

3.1.1.2 静力分析一般包括作业工况和极端工况，对杆件、节点、桩基等结构强度和桩基承载力进行分析。

3.1.1.3 对于深水导管架，P-Delta 效应、波浪动力效应对静力分析的影响不可忽略，应予以考虑。

第2节 基本工况

3.2.1 组块重量载荷

3.2.1.1 组块重量载荷应体现作业工况、极端工况下上部组块最危险的重量、重心组合。

3.2.1.2 在导管架设计阶段，可使用不可超越重量、名义重心、重心偏移的方式对组块重量载荷进行简化。以固定钻采平台为例，不可超越重量、名义重心、重心偏移定义如下：

- (1) 不可超越重量为作业工况、极端工况下的组块最大载荷；
- (2) 名义重心为作业工况、极端工况下，钻修井机不发生偏移的组块载荷重心；
- (3) 重心偏移为修井机移动造成的重心位置的最大偏移量。

3.2.1.3 在导管架服役阶段，组块载荷应采用上部组块最新重控报告中的载荷。

3.2.2 导管架重量载荷

3.2.2.1 导管架重量载荷应包括建模重量和未模拟附属结构重量，所有重量均应考虑相应的不确定系数。

3.2.2.2 对于明确建模的主要结构，应由工程软件自动生成其重力和浮力；对于明确建模的主要附属结构，建议将其密度修正为零。

3.2.2.3 对于未模拟的附属结构重量，应通过自定义载荷的方法考虑其重力和浮力。

3.2.2.4 导管架主腿、下水腿、裙桩套筒、桩、隔水套管、立管、J形管、套管、防沉板支架等结构应根据导管架充水布置图设置充水状态，以考虑抵消的浮力。

3.2.3 环境载荷

3.2.3.1 应参照第2章 2.4.2 计算深水导管架平台的环境载荷。

3.2.4 惯性荷载

3.2.4.1 应通过随机动力时程响应分析获得导管架平台的 DAF、MPME、惯性载荷分布，计算流程详见第4章。

第3节 组合工况

3.3.1 一般要求

3.3.1.1 应分别考虑极端工况（100年重现期）和作业工况（1年重现期）下，高/低水位的条件极值环境条件产生的环境载荷，一般条件极值环境条件包括：最大波浪和对应的风与海流的环境条件、最大海流和对应的风与波浪环境条件、最大风和对应的波与海流的环境条件。

3.3.1.2 对于内波工况（如有），应考虑与波浪和风的联合作用。一般情况下可与1年重现期的最大波浪和对应的风进行组合。

3.3.1.3 载荷组合的原则为：

- (1) 按可能的载荷条件进行组合；
- (2) 对结构产生最不利影响的载荷条件进行组合；
- (3) 活载荷在不同工况条件下的取值不同：在作业工况条件下，活载荷一般取50%；极端工况条件下，活载荷一般取37.5%；
- (4) 设备操作重量（湿重）减去干重在不同工况条件下的取值不同：在作业工况条件下，一般取100%；极端工况条件下，一般取75%。

3.3.1.4 表3.3.1.4列举了通用的载荷组合工况。

载荷组合工况表

表 3.3.1.4

基本工况	组合工况			
	作业工况	极端工况	拔桩工况	内波工况
结构自重（含浮力）	1.0	1.0	1.0	1.0
设备干重	1.0	1.0	1.0	1.0
湿重-干重	1.0	0.75	0.25	1.0
活载荷	0.5	0.375	0.00	0.5
钻修机操作载荷	1.0	-	-	1.0
钻修机极端载荷	-	1.0	1.0	-
作业风、波、流载荷（条件极值）	1.0	-	-	-
极端风、波、流载荷（条件极值）	-	1.0	1.0	-
内波、作业波浪及相关风载荷	-	-	-	1.0

第4节 结构校核

3.4.1 一般要求

3.4.1.1 参照 SY/T 10030-2018《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法--工作应力设计法》第6章、第7章分别对杆件和节点进行强度校核。

3.4.1.2 应根据静力分析得到的名义撑杆载荷和50%有效强度载荷校核导管架主要节点，对于次要节点，仅需按照名义撑杆载荷进行校核。

3.4.1.3 对于不满足规范要求的节点，可采用节点加强环的方法重新设计，其设计方法参照第10章第2节。

3.4.1.4 应分别校核极端工况、作业工况下钢桩强度和桩基承载能力。

3.4.1.5 钢桩强度参照 SY/T 10030-2018《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法--工作应力设计法》第6章进行校核。

3.4.1.6 对于桩基承载能力的许用安全系数，极端工况取 1.5，作业工况取 2.0。

第 4 章 动力响应分析

第 1 节 一般规定

4.1.1 一般要求

4.1.1.1 应按本章要求对深水导管架平台进行动力响应分析。

4.1.1.2 应分别对作业条件和极端条件进行动力响应分析，确定作业工况和极端工况下不同海况方向的动力放大系数和惯性荷载。

4.1.1.3 对深水导管架平台的动力响应分析应采用带有修正的峰能量的随机线性波浪。

4.1.1.4 设计海况的流会通过 Morison 方程式中的非线性拖曳力项对动力荷载造成影响，应在动力分析中予以考虑。

4.1.1.5 动力响应分析的模态质量应包括平台钢结构、所有附属构件、隔水套管、甲板荷载、充水构件中的水质量、结构上预计生长的海生物质量和水下构件的附连水质量，同时还要考虑由于海生物所引起的构件外径的增加。

4.1.1.6 动力响应分析得到的惯性荷载应作为在位分析的基本荷载之一与平台的结构荷载、功能荷载和环境荷载进行组合。

第 2 节 动力放大系数

4.2.1 一般要求

4.2.1.1 应采用随机波浪响应的时域方法分别计算作业条件和极端条件下的平台动力放大系数。

4.2.1.2 深水导管架具有较大的固有周期，单自由度方法计算的 DAF 会过于保守，推荐采用 Winterstein/Jensen 方法计算 DAF。

4.2.1.3 随机波浪响应分析所选择的随机种子应具有足够的代表性，其生成的随机波浪的均值、标准差、最大波峰高、偏度和峰度应满足表 4.2.1.3 的选取标准，以确保海况过程具有典型的高斯性，且具有足够的规则波数量。

随机波浪的选取标准

表 4.2.1.3

规则波数量	≥ 200
波高均值	0
最大波峰高 H_m	$0.95\frac{H_s}{4}\sqrt{2\ln N} < H_m < 1.075\frac{H_s}{4}\sqrt{2\ln N}$
标准差 σ	$0.99\frac{H_s}{4} < \sigma < 1.01\frac{H_s}{4}$
偏度 S	$-0.03 < S < 0.03$
峰度 K	$2.9 < K < 3.1$

注： H_s 为有义波高， $N = \text{模拟时长}/T_z$ ，对于 3 小时的模拟时长，N 可取为 1000。

4.2.1.4 应采用均值和方差的趋于平稳后的波面时程计算结构响应，通常不考虑开始部分的瞬态时程，瞬态时程的时长不小于 200 s。

4.2.1.5 随机波浪响应分析的时间步长应能准确反映较高的频率，应取跨零周期和平台固有周期中小者的二十分之一。

4.2.1.6 随机波浪结构响应的 DAF 由动响应和静响应(基底剪力和倾覆力矩)的 MPME 按公式(4.2.1.6-1) 进行计算。

$$DAF_{F_i} = MPME_{d, F_i} / MPME_{s, F_i} \quad (4.2.1.6-1)$$

式中：

F_i —— X, Y 方向的基底剪力和倾覆弯矩；

d —— 动态响应；

s —— 静态响应。

4.2.1.7 可以考虑取多个满足高斯性条件的随机种子计算 DAF，取其均值作为最终的 DAF，以进一步消除随机性的影响。

第3节 响应的最可能极大值

4.3.1 一般要求

4.3.1.1 采用 Winterstein/Jensen 方法计算深水导管架的 MPME 值的具体过程如下：

第1步：计算结构响应过程的统计参数：均值 μ 、标准差 σ 、偏度 α_3 和峰度 α_4 。

第2步：构建标准化响应过程， $Z = (R - \mu) / \sigma$ ，并利用该过程计算响应跨零周期的出现次数 N 。对于3小时的模拟时间， N 可以假设为1000。

第3步：利用第1步的特征值根据公式(4.3.1.1-1)-(4.3.1.1-3)计算参数 h_3 ， h_4 ， K 。

$$h_3 = \frac{\alpha_3}{4 + 2\sqrt{1 + 1.5(\alpha_4 - 3)}} \quad (4.3.1.1-1)$$

$$h_4 = \frac{\sqrt{1 + 1.5(\alpha_4 - 3)} - 1}{18} \quad (4.3.1.1-2)$$

$$K = (1 + 2h_3^2 + 6h_4^2)^{-0.5} \quad (4.3.1.1-3)$$

如果第1步计算得到的峰度 $\alpha_4 > 5$ ，则需要采用 Jensen 方法对参数 h_3 ， h_4 ， K 进行更新，更新方法如下：

(1) 构件 C_1 ， C_2 ， C_3 的三元非线性方程组：

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= C_1^2 + 6C_1C_3 + 2C_2^2 + 15C_3^2 \\ \sigma^3\alpha_3 &= C_2(6C_1^2 + 8C_2^2 + 72C_1C_3 + 270C_3^2) \\ \sigma^4\alpha_4 &= 60C_2^4 + 3C_1^4 + 10395C_3^4 + 60C_1^2C_2^2 + 4500C_2^2C_3^2 + \\ &\quad 630C_1^2C_3^2 + 936C_1C_2^2C_3 + 3780C_1C_3^3 + 60C_1^3C_3 \end{aligned} \quad (4.3.1.1-4)$$

(2) 设置 C_1 ， C_2 ， C_3 的初始值， $C_1 = \sigma K(1 - 3h_4)$ ， $C_2 = \sigma K h_3$ ， $C_3 = \sigma K h_4$ ；

(3) 求解非线性方程组(4.3.1.1-4)，得到新的 C_1 ， C_2 ， C_3 ；

(4) 更新参数 h_3 ， h_4 ， K 的值， $K = (C_1 + 3C_3) / \sigma$ ， $h_3 = C_2 / (\sigma K)$ ， $h_4 = C_3 / (\sigma K)$ 。

第4步：采用公式(4.3.1.1-5)计算传递过程的最可能值 U ，该值代表零均值高斯过程：

$$U = \sqrt{2 \ln(N \cdot \frac{3 \text{ 小时}}{\text{模拟时间 (小时)}})} \quad (4.3.1.1-5)$$

第5步：采用公式(4.3.1.1-6)计算转换成标准化变量的最大可能值 Z_{MPM} ：

$$Z_{MPM} = K(U + h_3(U^2 - 1) + h_4(U^3 - 3U)) \quad (4.3.1.1-6)$$

第6步：采用公式(4.3.1.1-7)计算过程的响应最可能极值 R_{MPME} ：

$$R_{MPME} = \mu + \sigma Z_{MPM} \quad (4.3.1.1 - 7)$$

第4节 惯性荷载分布

4.4.1 一般要求

4.4.1.1 应根据所计算的 DAF 和 MPME 计算平台的惯性荷载分布。

4.4.1.2 应根据结构的模态质量矩阵和模态参与系数，将惯性荷载分布到平台质量凝集点上，以获得尽可能真实的荷载分布。

4.4.1.3 模态质量矩阵为通过模态分析得到 $N \times N$ 阶矩阵， $N = 3i$ ， i 为设置成保留 x ， y ， z 方向自由度的质量凝集点数量。

4.4.1.4 模态参与系数可通过公式 (4.4.1.4-1) 计算：

$$\begin{aligned} \alpha_x \phi_{x1} M + \beta_x \phi_{x2} M &= (DAF_{fx} - 1) MPME_{s, fx} \\ \alpha_x \phi_{x1} MZ + \beta_x \phi_{x2} MZ &= (DAF_{mx} - 1) MPME_{s, my} \\ \alpha_y \phi_{y1} M + \beta_y \phi_{y2} M &= (DAF_{fy} - 1) MPME_{s, fy} \\ \alpha_y \phi_{y1} MZ + \beta_y \phi_{y2} MZ &= (DAF_{my} - 1) MPME_{s, mx} \end{aligned} \quad (4.4.1.4 - 1)$$

式中：

Z ——质量点的垂向坐标矩阵；

M ——质量矩阵；

α_x 、 β_x 、 α_y 、 β_y —— x 、 y 方向一、二阶模态参与系数；

ϕ_{x1} 、 ϕ_{x2} 、 ϕ_{y1} 、 ϕ_{y2} ——平台 x 、 y 方向一、二阶振型。

4.4.1.5 惯性荷载的分布可通过公式 (4.4.1.5-1) 计算：

$$\begin{aligned} F_{ix} &= \alpha_x \phi_{x1} M + \beta_x \phi_{x2} M \\ F_{iy} &= \alpha_y \phi_{y1} M + \beta_y \phi_{y2} M \end{aligned} \quad (4.4.1.5 - 1)$$

式中：

F_{ix} ， F_{iy} ——平台 x ， y 方向惯性力分布荷载。

第5章 地震分析

第1节 一般规定

5.1.1 定义

5.1.1.1 强度要求：旨在提供一个具有足够强度和刚度的平台，以确保在其结构寿命期内，在不超过具备合理可能性的地震震动水平下，结构不发生明显的损伤。

5.1.1.2 韧性要求：旨在确保平台具有足够的储备能力，以防止其在罕见的强烈地震运动中倒塌，尽管此时可能会发生结构损坏。

5.1.1.3 有效大地加速度：用于描述确定平滑、规范化设计谱的尺寸的地面加速度幅值的设计系数。

5.1.1.4 地面运动：由地震引起的大地振动。任何点的运动都可以用加速度、速度或位移时程来描述。

5.1.1.5 响应谱：描述了一系列具有不同固有周期但内部阻尼相同的单自由度振子对地面运动的最大响应。特定地震加速度记录的响应谱实际上是该地面运动的特性，以简单（单自由度）结构的最大响应表示。当该响应用一组平滑线表示时，称为平滑响应谱。

5.1.1.6 时间历程：地面运动或响应随时间的连续记录。

5.1.2 强度水平与韧性水平

5.1.2.1 地震分析需考虑强度水平地震和韧性水平地震。

5.1.2.2 对于强度水平要求，地面运动重现期通常可取为200年。

5.1.2.3 对于韧性水平要求，需考虑罕见强震的地面运动，其重现期根据地震环境的不同可取为几百年到几千年，通常可取1000年。

第2节 桩基线性化

5.2.1 一般要求

5.2.1.1 可采用线性系统表示等效土壤刚度。

5.2.1.2 应使用与地震响应相当的力来获取线性化的等效土壤刚度矩阵，这个过程需要进行多次迭代，直至两个迭代步之间所获得的结构固有频率相差不大。

第3节 模态分析

5.3.1 一般要求

5.3.1.1 对于响应谱方法，应根据需要考虑尽可能多的模态，以保证响应具有足够代表性。对三个主方向中的每一个方向，应包括至少两个具有最高总体响应的模态以及重要的扭转模态。

5.3.1.2 应保证质量参与系数在 X 、 Y 方向不小于90%， Z 方向不小于70%。

第4节 地震响应分析

5.4.1 分析基础

5.4.1.1 使用动力分析程序，如响应谱分析或时程分析。

5.4.2 结构模型

5.4.2.1 动力分析中使用的质量，应包括与平台质量，结构及附属构件内部的流体质量，以及附加质量。附加质量可按如下估算：垂直于单个结构框架及附属构件纵轴方向的横向运动的排水质量。对于沿结构框架及附属构件纵轴方向的运动，其附加质量可以忽略。

5.4.2.2 平台质量应包括平台固定重量（包括结构、设备、附件的重量），活荷载，以及75%的最大供应和储备载荷。

5.4.2.3 分析模型应包括平台刚度和质量的三维分布。平台刚度或质量分布的不对称可能导致显著的扭转响应，应予以考虑。

5.4.2.4 在计算撑杆的动力特性和桩支撑的钢结构的动力特性时，弹性分析应使用临界值5%的统一模型阻尼比。在有确定可靠的资料时，也可使用其他的阻尼比。

5.4.3 响应分析

5.4.3.1 深水导管架的地震响应分析推荐使用谱分析方法；在使用时程分析的情况下，结构响应的计算可参照相关规范开展。

5.4.3.2 当使用响应谱法且在两个水平方向上相等的使用同一个设计谱时，应使用完全二次组合方法（CQC）来组合各阶模态响应，使用平方和的平方根方法（SRSS）来组合各方向响应。

5.4.3.3 地震载荷按水平方向（X向，Y向）100%，垂直方向（Z向）50%进行方向组合。

5.4.3.4 质量参与系数要求同5.3.1.2。

5.4.3.5 地震载荷应与其他同时作用的载荷相组合，比如重力、浮力、静水压力等。重力载荷应包括5.4.2.2中的所有重量。

5.4.3.6 对于韧性分析，结构模型和土单元模型还应包括，在极端载荷变向作用以及轴向力和弯矩、静水压力和局部惯性力（适用时）的相互作用下，结构和土单元模型的强度及刚度特性的退化。应考虑由于结构和基础的弹性或非弹性变形所产生的 *P-Delta* 效应。

第5节 结构校核

5.5.1 强度要求

5.5.1.1 在计算构件应力时，由地震荷载引起的应力应与重力、静水压力和浮力引起的应力采用线性叠加方式相组合。对于强度要求，许用应力可提高70%。

5.5.2 韧性要求

5.5.2.1 强度水平的地面水平运动加速度在0.05 g~0.10 g（含0.10 g）范围内的区域，如果使用罕见强震的地面运动强度和特征进行结构强度分析，其结果满足了强度要求，则可认为导管架构件的所有地震要求均被满足。否则应进行分析以证明导管架结构-基础系统具备抵抗罕见强震而不倒塌的能力。

5.5.3 节点校核

5.5.3.1 管节点校核许用应力可提高 60%。

5.5.3.2 在 5.5.2 中的情况下，管节点校核使用计算的节点载荷，而不是杆件的拉伸载荷或压缩屈曲载荷。

5.5.3.3 强度水平的地面水平运动加速度为 0.1 g（包含 0.1 g）或更高时，主要结构杆件的节点应根据管节点所连接构件的拉伸屈服载荷或者压缩屈曲载荷来校核。

第6章 疲劳分析

第1节 一般规定

6.1.1 一般要求

6.1.1.1 对深水导管架结构应进行详细的疲劳分析,建议采用谱分析方法。如果证明对力及杆件响应具有足够的代表性,也可使用其他合理的方法。

6.1.1.2 谱分析方法应确定每一海况的应力响应。对于在平台自振周期附近具有显著能量的海况,应考虑动力影响。

6.1.1.3 波浪条件应是长期内预期出现的全部海况的集合。为了结构分析的目的,这种集合可以集中为波浪能量谱和具有出现概率的物理参数来表达的代表性海况,常见的如波浪散布图。

6.1.1.4 疲劳分析应考虑波浪散布图的方向性以及平台方位。

6.1.1.5 作业水深通常采用平均水深。

6.1.1.6 疲劳分析的波浪运动系数和隔水套管的遮蔽系数应取 1.0。 C_d 、 C_m 按表 2.1.4.5 选取。

6.1.1.7 阻尼系数的选择可能有极深的影响,根据在低海况的测量,建议 2%或更低的临界值。

第2节 桩基线性化

6.2.1 一般要求

6.2.1.1 疲劳分析中桩基的作用可以使用线性基础表示,通常可采用“疲劳损伤中心”海况条件对应的基础刚度。

6.2.1.2 “疲劳损伤中心”海况是指使结构产生了最大的疲劳损伤(占的比例最大)的波浪。大部分的疲劳损伤由中低海况引起,因此损伤中心应该是波浪散布数据中概率较高的中低海况波浪。

6.2.2 中心损伤波的计算

6.2.2.1 可根据波浪散布数据,按以下公式计算中心损伤波的相关数据:

$$H_{cs} = \sum(D_i \times H_{si}) / \sum(D_i) \quad (6.2.2.1-1)$$

$$T_{cz} = \sum(D_i \times T_{zi}) / \sum(D_i) \quad (6.2.2.1-2)$$

$$D_i = P_i \times (H_{si})^{a \times m} / (T_{zi}) \quad (6.2.2.1-3)$$

$$H_{max} = b \times h_{cs} \quad (6.2.2.1-4)$$

$$T_{max} = c \times T_z \quad (6.2.2.1-5)$$

式中:

a ——系数,建议根据 ISO19902 第 A.16.7.2.3.2 节进行选取;

b ——最大波高与有义波高的对应系数,建议根据 CCS《海洋工程结构设计和评估环境条件应用指南》第 5 章第 3 节进行计算;

c ——最大波高对应周期与跨零周期的对应系数,建议根据 CCS《海洋工程结构设计和评估环境条件应用指南》第 5 章第 3 节进行计算;

H_{cs} ——中心损伤波的有义波高, m;
 H_{max} ——中心损伤波的最大波高, m;
 H_{si} ——第 i 个波浪的有义波高, m;
 m ——S-N 曲线第一段的斜率, 通常取 3.0;
 P_i ——第 i 个波浪出现的概率;
 T_{cz} ——中心损伤波的跨零周期, s;
 T_{max} ——中心损伤波的最大波高对应的波浪周期, s;
 T_{zi} ——第 i 个波浪的跨零周期, s, 建议根据 CCS《海洋工程结构设计和评估环境条件应用指南》第 5 章第 3 节进行计算。

第3节 模态分析

6.3.1 一般要求

6.3.1.1 振型数量的设置应满足 X , Y , Z 方向的质量参与系数要求, 质量参与系数水平方向应大于 90%, 竖直方向应大于 70%。

6.3.1.2 由于平台的自振周期可随设计假设和甲板操作质量显著地变化, 因此应严格检查理论周期, 特别是当它落入平台基底剪力传递函数的低谷区时, 周期应向传递函数更保守的位置偏移 5%~10%, 应在合理的范围内采用合适的方式通过调节质量或刚度来实现。

第4节 波浪响应分析

6.4.1 一般要求

6.4.1.1 传递函数波浪频率的选取应覆盖平台结构前 5 阶固有频率及其相邻 2%和 5% 的频率, 以便准确捕获平台的波浪动力响应作用。

6.4.1.2 生成传递函数的波浪序列, 其波高的最大值应控制在合理范围内。

6.4.1.3 对所研究的每一构件相贯线周围的每一部位, 都应计算出对各种海况的应力响应, 应充分考虑总体和局部的应力影响。

6.4.1.4 对于谱疲劳分析, 由 Morison 公式得到不同频率下单位波高的波浪荷载, 并通过有限元分析各波浪方向下的传递函数, 根据下式得到不同方向不同海况的应力响应谱:

$$S_{\sigma_{i,j}}(f) = H_i(f)^2 S_{i,j}(f) \quad (6.4.1.4 - 1)$$

其中: H_i 为第 i 个方向的传递函数, $S_{i,j}$ 为第 i 个方向第 j 个海况的波浪谱。

第5节 疲劳寿命计算

6.5.1 热点应力

6.5.1.1 发生在管连接处的局部应力, 应由直接邻近节点连接处考虑了适当应力集中系数的热点应力来表示。

6.5.1.2 对于简单管节点的应力集中系数详见 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估技术指南》第 3 章 3.5.2 和附录 2 第 2 节。

6.5.1.3 带内加强环管节点的应力集中系数详见 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估技术指南》第 3 章 3.5.4 和附录 2 第 5 节。

6.5.1.4 对接焊缝（含过渡锥段）的应力集中系数详见 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估技术指南》第3章 3.3.1 和 3.3.2。

6.5.1.5 灌浆管节点的应力集中系数见 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估技术指南》第3章 3.5.5。

6.5.2 S-N 曲线

6.5.2.1 S-N 曲线通常以应力幅值为纵坐标，以应力循环次数的对数值 $\lg N$ 为横坐标表示。

6.5.2.2 S-N 曲线的选取参见 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估技术指南》第2章第5节。

6.5.3 壁厚效应

6.5.3.1 采用 WJ 曲线时，对于厚度超过 16 mm 的焊接节点，应以下式进行焊接节点厚度修正。

$$S = S_0 (t_{ref}/t)^{0.25} \quad (6.5.3.1 - 1)$$

式中：

t_{ref} ——参考厚度，16 mm；

S ——许用应力范围；

S_0 ——由 S-N 曲线得出的许用应力范围；

t ——待预测疲劳寿命的杆件壁厚。

6.5.3.2 如果按照 SY/T 10030-2018 规定进行焊缝外形修整，上述公式的指数可替换为 0.20。对于焊趾进行打磨处理，指数可替换为 0.15。

6.5.4 焊缝改善技术

6.5.4.1 对于焊接节点，有以下几种改善疲劳性能的方法，包括焊趾毛刺控制打磨、焊缝外形修整，使其成为与母材光滑过度的凹形剖面。

6.5.4.2 采取改善措施后的疲劳影响效果参见 CCS《海洋工程结构物疲劳强度评估技术指南》第8章第2节和第3节。

6.5.5 疲劳寿命安全系数

6.5.5.1 通常每个节点和构件的设计疲劳寿命应不小于考虑了安全系数后的结构使用寿命。对设计疲劳寿命，损伤比 D 不应超过 1.0。

6.5.5.2 对于在位条件，钢质构件的疲劳安全系数应取决于失效后果（即关键程度）和在役可检测性。关键构件是那些一旦失效将导致灾难性后果的构件。如果没有针对深水导管架结构进行更详细的安全分析，其疲劳安全系数，可考虑采用表 6.5.5.2 中推荐的数值。

疲劳安全系数表

表 6.5.5.2

疲劳关键部位	可检测	不可检测
否	2	5
是	5	10

6.5.5.3 通常拖航期间的结构疲劳应予以考虑，如无更详实的计算，可考虑 1 年的疲劳损伤。

6.5.6 累积疲劳损伤结果

6.5.6.1 对各个方向所有海况的损伤值进行叠加即得到该节点的总的损伤值，其倒数为该节点的计算疲劳寿命 F 。

$$F = \frac{1}{D} = \frac{1}{\sum D_{i,j}} \quad (6.5.6.1 - 1)$$

式中：

$D_{i,j}$ ——不同方向下各海况对应的损伤值。

第7章 装船分析

第1节 一般规定

7.1.1 一般要求

7.1.1.1 深水导管架一般采用整体拖拉装船。本章适用于深水导管架在拖拉装船过程中的强度分析。

第2节 导管架强度分析

7.2.1 装船结构分析中，导管架和码头（或船）之间的支撑用只可压缩单元模拟，当导管架某些支撑节点位于码头和船舶之间的间隙，该节点失去支撑而不受力。

7.2.2 拖拉装船时由于潮汐和波浪的作用，码头与驳船上的滑道上端存在一定的高度差，被拖导管架在强度校核时需考虑装船过程中船的垂向运动引起的高度差。工程中通常考虑驳船有 $\pm 20\sim 25\text{ mm}$ 的升沉运动。

7.2.3 结构分析需考虑导管架拖拉装船全过程中处于不同位置的典型工况，并考虑上述7.2.2节中的高度差。

7.2.4 杆件和节点应力应根据 SY/T 10030《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法-工作应力设计法》第6&7章进行校核。

第8章 运输分析

第1节 一般规定

8.1.1 一般要求

8.1.1.1 本章为深水导管架海上运输分析提供推荐做法，主要内容包括运输船总纵强度分析、导管架和运输船联合体运动响应分析、导管架结构强度分析。

8.1.1.2 海上运输分析的环境条件选取原则可参照 CCS《大型海工结构物运输和浮托安装分析指南》第4章第2节。

8.1.1.3 运输船的稳性分析方法及衡准可参照 CCS《大型海工结构物运输和浮托安装分析指南》第4章第3节。

第2节 运输船总纵强度分析

8.2.1 一般要求

8.2.1.1 运输船的总纵强度校核方法可采用许用强度法，该方法只需校核静水状态的总纵强度。

8.2.1.2 对于深水导管架海上运输，在进行运输船总纵强度分析时，应合理考虑导管架在运输船上的重量分布方式。

8.2.2 导管架重量分布

8.2.2.1 导管架在运输船上的重量分布建议考虑如下：建立驳船与导管架之间的垂向连接件，不考虑连接件本身的变形，在静水工况下进行结构分析，进而获取导管架重量沿运输船船长方向上的分布，然后采用点载荷方式加载到运输船上，进行运输船静水剪力和弯矩的计算。

第3节 运动响应分析

8.3.1 一般要求

8.3.1.1 导管架和运输船联合体的运动响应结果是进行绑扎方案设计和结构完整性校核的基础，可通过水动力分析、模型试验或使用推荐运动值得到运动响应设计值。

8.3.1.2 若有可靠（通过审查）的模型试验，可利用模型试验获取运动响应结果。应考虑模型试验的比例效应，一般将试验值增加 10% 或一个相关方均认可的值。

8.3.1.3 如果没有进行水动力分析和模型试验结果，可参照 CCS《海上拖航指南》附录 1 表 3.1 选取运动响应推荐值。

8.3.2 水动力分析

8.3.2.1 至少应考虑以 45° 为间隔的 $0^\circ \sim 180^\circ$ 浪向下的船舶运动响应分析。

8.3.2.2 运输分析海况应考虑波浪周期的敏感性，即有义波高和一系列谱峰周期的组合。

8.3.2.3 水动力分析方法基于二维切片理论/三维势流理论进行水动力计算得到运动

RAO，然后通过统计预报得到3小时MPME。

8.3.3 风载引起的运动

8.3.3.1 除考虑波浪诱导运动外，还需考虑风载引起的运动。

8.3.3.2 风载引起的运动分量主要包括风引起的风倾角对横摇（或纵摇）的增加，以及横摇（或纵摇）产生的重力加速度的分量，即横向（纵向）加速度的增加。

8.3.3.3 计算风载引起的运动通常采用1分钟阵风，并保守认为风引起横摇（或纵摇）运动和波浪诱导运动的线性叠加。

8.3.3.4 在稳性较好而受风面积不大的情况下，如不便计算风倾角，可在波浪引起的最大运动响应的基础上考虑适当安全系数，通常可增加2%~3%。

第4节 导管架结构分析

8.4.1 一般要求

8.4.1.1 导管架必须有足够的强度以承受惯性载荷和风载荷，以及外伸出船舶所导致的额外载荷。

8.4.1.2 导管架外伸出船舶的部分在运输过程中有可能浸没于水中，遭受波浪砰击和/或上浪产生的载荷，应在分析中予以考虑。

8.4.1.3 如导管架外悬入水的情况较为严重，需通过运动分析或试验方法评估其对导管架结构的影响。

8.4.2 柔性变形

8.4.2.1 深水导管架运输分析中，若驳船和导管架之间的柔性变形对结构强度的影响不可忽略，应予以考虑。

8.4.2.2 应对导管架和运输船联合体在静载工况和波浪工况下进行结构分析，获取运输船的柔性变形，并在导管架结构分析中把柔性变形作为边界条件考虑。

8.4.3 载荷工况

8.4.3.1 载荷工况须考虑各航向下风和浪引起的波动载荷及静载荷的叠加。

8.4.3.2 静载荷包括重力以及恒定风作用下产生的风载和风倾角效应。

8.4.3.3 波动载荷主要考虑波浪引起的惯性力，应考虑各浪向下6个自由度运动加速度的组合。

8.4.4 强度校核

8.4.4.1 导管架节点和杆件应力应根据SY/T 10030《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法--工作应力设计法》第6&7章进行校核。

第9章 下水与扶正分析

第1节 一般规定

9.1.1 一般要求

9.1.1.1 本章适用于深水导管架的滑移下水分析和吊机辅助扶正分析。

9.1.1.2 导管架下水分析和扶正分析通常在静水中进行，不考虑风、浪、流的影响。

9.1.1.3 导管架滑移下水分析中对驳船的校核另行考虑，不在本指南中涉及，可参照 CCS《大型海工结构物运输和浮托安装分析指南》第5章第2节 5.2.4 驳船强度。

9.1.2 导管架滑移下水

9.1.2.1 应进行导管架下水动力分析（下水轨迹和受力分析）、结构强度分析和下水参数敏感性分析。

9.1.2.2 导管架分析要点包括：

(1) 导管架是否保持良好的下水轨迹，即不出现大的横摇，一般要求小于 0.25 度，底部间隙足够；

(2) 导管架在下水过程中的结构强度是否满足要求；

(3) 导管架下水过程中速度较快，在拍击力作用下的杆件强度是否满足要求。

9.1.2.3 导管架的下水参数敏感性分析、储备浮力要求及其他校核衡准参见 CCS《大型海工结构物运输和浮托安装分析指南》第5章第2节分析准则。

9.1.3 导管架扶正分析

9.1.3.1 导管架扶正分析主要验证扶正过程中的稳性高，泥面间隙和吊机/吊具能力是否能满足要求，同时校核导管架的结构强度。

第2节 下水动力分析

9.2.1 分析模型

9.2.1.1 导管架水动力、浮力和质量模型应包括主结构和附属结构。

9.2.1.2 驳船模型应考虑增加驳船质量和浮力的所有构件，包括滑道和摇臂。驳船的浮力模型在下水期间应按驳船姿态变化准确模拟。

9.2.1.3 对驳船和导管架的拖曳力系数、附加质量和阻尼系数应进行精确模拟。

9.2.2 分析方法

9.2.2.1 利用专业软件对导管架滑移下水进行时域仿真分析，获取导管架和驳船的运动轨迹、摇臂反力的时间历程，依据衡准校核关键参数。

第3节 下水结构分析

9.3.1 分析工况

9.3.1.1 下水过程中,导管架的结构分析需考虑若干个特征时刻作为分析工况。一般选取导管架处在摇臂上转动前、转动时、导管架与驳船分离时以及下潜至最大深度时作为结构分析的特征时刻。除此之外,还需选取导管架下水腿的管节点以及相邻节点间管段中心位置经过摇臂销轴时作为特征时刻进行结构分析。

9.3.2 分析模型

9.3.2.1 导管架下水结构分析应考虑导管架的浮力、重力、惯性力、摩擦力、支撑力和水动力等。

9.3.2.2 导管架和驳船/摇臂之间用大刚度、只可压缩的弹簧在每个腿节点处连接;摇臂销轴处施加垂直于摇臂的固定约束,并在导管架端部施加小刚度的水平弹簧约束。图 9.3.2.2 给出了导管架转动前、转动时、分离时以及下水后的边界条件示意图。

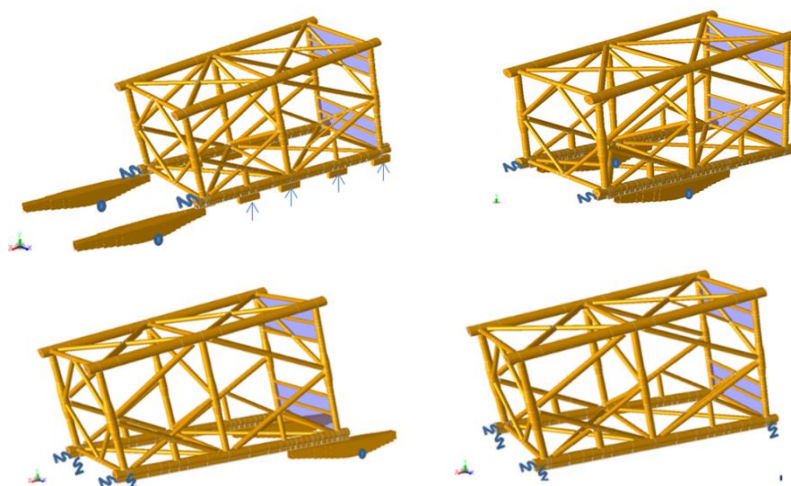


图 9.3.2.2 导管架下水结构分析模型示意图

9.3.3 强度校核

9.3.3.1 杆件和节点应力应根据 SY/T 10030《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法--工作应力设计法》第 6&7 章进行校核。

9.3.3.2 导管架的最大入水速度可用于砰击强度校核,也可考虑用下水动力分析得到导管架上每个杆件的入水速度校核砰击强度。

第4节 扶正分析

9.4.1 一般要求

9.4.1.1 导管架扶正分析应考虑完整工况和舱室破损工况。

9.4.1.2 导管架扶正过程中的储备浮力、稳性高、泥面间隙等校核衡准参见 CCS《大型海工结构物运输和浮托安装分析指南》第 6 章第 2 节分析准则。

9.4.1.3 吊机辅助方式的导管架扶正分析方法,可分为静态分析和动态分析。

9.4.2 扶正静态分析

9.4.2.1 静态分析的目的是获取扶正的操作流程方案,即吊机提升/下放和充水的步骤和幅度,并校核其可操作性。

9.4.2.2 静态分析是通过对每一次吊机和(或)压载的操作进行平衡位置的求解,确定每一步导管架的压载量和泥面间隙,以及吊机的高度和吊重。

9.4.3 扶正动态分析

9.4.3.1 动态分析的目的是考察起吊船的波浪诱导运动对扶正的影响。

9.4.3.2 从静态分析中选取若干个特征状态,获取该状态下吊钩高度、导管架浮态、充水状态等信息,求解系统的平衡状态,在此平衡状态下进行动态分析。动态分析可采用频域分析方法或时域分析方法。

第5节 扶正结构分析

9.5.1 分析工况

9.5.1.1 考虑扶正过程中若干个特征姿态作为分析工况进行导管架结构分析。

9.5.2 分析模型

9.5.2.1 考虑导管架浮力、重力、惯性力和水动力(如进行动态分析)等,同时用拉杆单元模拟吊索,在导管架底部水平层或裙桩套筒底部施加小刚度弹簧约束。

9.5.3 强度校核

9.5.3.1 杆件和节点应力应根据 SY/T 10030《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法--工作应力设计法》第 6&7 章进行校核。

第 10 章 附加分析

第 1 节 坐底稳定性及防沉板结构分析

10.1.1 一般要求

10.1.1.1 深水导管架坐底稳定性及防沉板结构分析主要包括：

- (1) 导管架抗倾覆稳定性分析；
- (2) 导管架抗滑移稳定性分析；
- (3) 土壤抗压性分析；
- (4) 防沉板结构强度分析。

10.1.1.2 应确保导管架在所有钢桩安装方案下，其坐底稳定性及防沉板结构强度可抵御可能遭遇的环境载荷。

10.1.1.3 主结构、附属结构的结构重量和浮力应与重控报告保持一致。

10.1.1.4 导管架主腿、下水腿、裙桩套筒、立管、J 形管、套管、防沉板支架等结构应根据导管架充水布置图设置充水状态，以考虑抵消的浮力。

10.1.2 导管架抗倾覆稳定性分析

10.1.2.1 倾覆力矩一般包括波浪、海流产生的倾覆力矩和由于钢桩在裙桩套筒内倾斜、钢桩和桩锤重量产生的附加倾覆力矩。

10.1.2.2 附加倾覆力矩应与波浪、海流引起的倾覆力矩方向一致，以保守考虑导管架抗倾覆能力。

10.1.2.3 恢复力矩一般包括导管架水中自重产生的恢复力矩和由于导管架意外倾斜导致的恢复力矩折减，倾斜角一般可取 1° 。

10.1.2.4 恢复力臂为导管架水中重心至倾覆轴的水平距离，该轴距导管架泥面处水平层边缘的水平距离一般为 $B(\text{或 } L)/4$ ， B 、 L 分别为防沉板的宽度和长度。

10.1.2.5 抗倾覆稳定性许用安全系数一般为 1.5。

10.1.3 导管架抗滑移稳定性分析

10.1.3.1 导管架抗滑移力可参照 SY/T 10030《海上固定平台规划设计和建造的推荐作法--工作应力设计法》第 9 章第 12 节第 1 条计算。

10.1.3.2 抗滑移稳定性许用安全系数一般为 1.5。

10.1.4 土壤抗压性分析

10.1.4.1 土壤极限抗压能力应按照工程地质调查报告选取。

10.1.4.2 土壤抗压许用安全系数组合工况取 1.5，静载工况取 2.0。

10.1.5 防沉板结构强度分析

10.1.5.1 防沉板结构强度分析应建立局部有限元模型，该模型应包括防沉板主梁、槽型板、防沉板与导管架水平层之间的连接立柱、防沉板斜撑以及防沉板附近的导管架结构。

10.1.5.2 应校核防沉板主梁、防沉板与导管架水平层连接立柱、防沉板斜撑以及防沉板附近导管架杆件的强度，校核准则参照第 3 章第 4 节的相关规定。

10.1.5.3 应校核防沉板附近导管架节点的强度，校核准则参照第 3 章第 4 节的相关规

定。

10.1.5.4 应校核槽型板截面的抗剪切和抗弯曲能力，校核准则参照第 3 章第 4 节的相关规定。

第 2 节 节点加强环

10.2.1 一般要求

10.2.1.1 管节点强度不满足规范要求时，可用节点加强环进行加强。

10.2.1.2 工程上可应用以下 3 种方法确定节点加强环尺寸、数量：

- (1) 假设节点载荷完全由加强环在弹性范围内抵抗；
- (2) 假设节点载荷完全由加强环在塑性范围内抵抗；
- (3) 假定节点载荷由简单节点强度和加强环极限能力共同抵抗。

10.2.1.3 方法(3)确定了加强环节点的能力下限，方法(2)确定了加强环节点的能力上限，方法(1)位于两种方法之间，因此在条件允许的情况下，推荐采用方法(2)确定节点加强环的尺寸和数量。

10.2.2 能力上限法

10.2.2.1 概述

(1) 根据装船过程中导管架的位置，节点撑杆被定义为面内撑杆和面外撑杆。图 10.2.2.1(1)显示面内撑杆的典型侧视图，图 10.2.2.1(2)显示了面外撑杆的典型俯视图，图 10.2.2.1(3)显示了节点的典型横截面图。

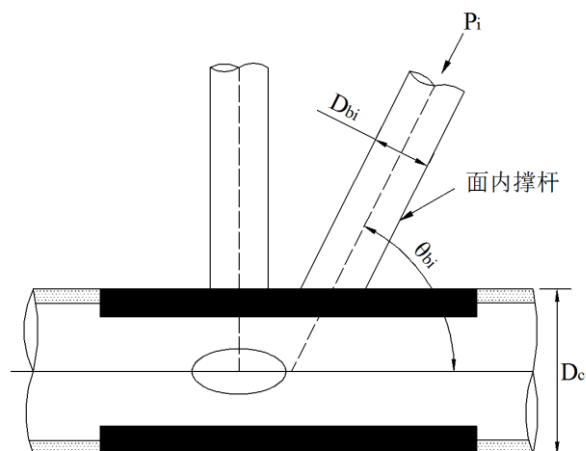


图 10.2.2.1(1) 面内撑杆的典型侧视图

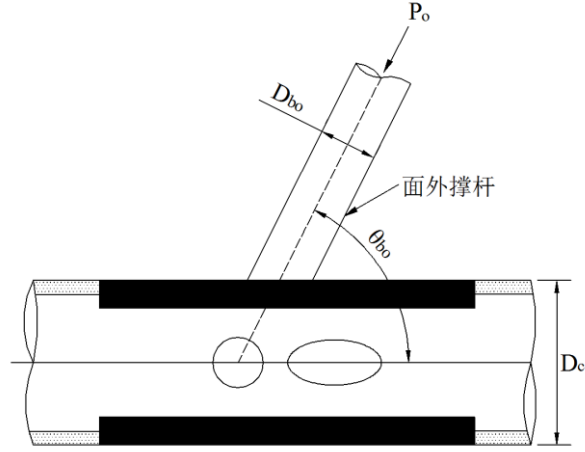


图 10.2.2.1(2) 面外撑杆的典型俯视图

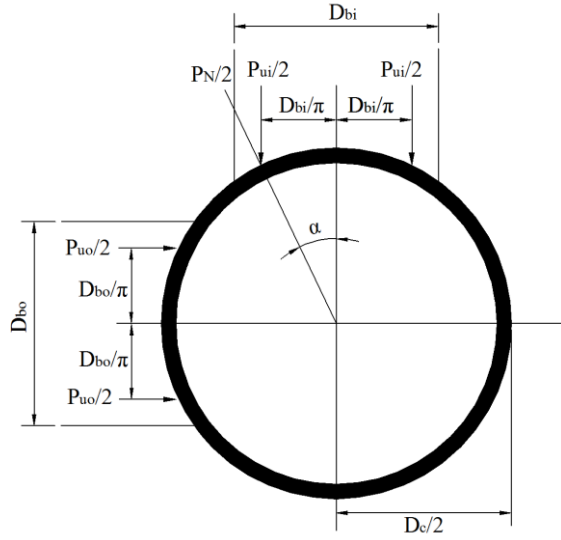


图 10.2.2.1(3) 节点的典型横截面图

(2) 轴向载荷垂向分量

根据图 10.2.2.1(3)，可得出以下关系式：

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{2D_{bi}}{\pi D_c} \right) \quad (10.2.2.1-1)$$

$$P_{ui} = FL \sin \theta_{bi} \left(P_i + \frac{\pi M_i}{D_{bi}} \right) \quad (10.2.2.1-2)$$

$$P_{uo} = FL \sin \theta_{bo} \left(P_o + \frac{\pi M_o}{D_{bo}} \right) \quad (10.2.2.1-3)$$

$$P_N = P_{ui} \cos \alpha \quad (10.2.2.1-4)$$

式中： α ——至上塑性铰的角度， $^\circ$ ；

FL ——塑性分析载荷因子，取 1.7；

P_N ——面内撑杆轴向载荷的垂向分量，kN；

P_i ——面内撑杆的轴向载荷，kN；

D_{bi} ——面内撑杆的直径，mm；

M_i ——面内撑杆的弯矩，包括面内弯矩和面外弯矩，m-kN；

P_{ui} ——面内撑杆的设计横向载荷，kN；

P_o ——面内撑杆的轴向载荷，kN；

D_{bo} ——面内撑杆的直径，mm；

M_o ——面内撑杆的弯矩，包括面内弯矩和面外弯矩，m-kN；

P_{uo} ——面内撑杆的设计横向载荷，kN。

10.2.2.2 剪切校核

加强环节的抗剪切能力校核公式如下：

$$V_{allow} = V_{shell} + V_{rings} \quad (10.2.2.2 - 1)$$

式中： V_{allow} ——加强环节的抗剪切能力，kN；

V_{shell} ——弦杆加厚段的抗剪切能力， $P_a \sin \theta$ ，kN；

V_{rings} ——加强环的抗剪切能力，kN；

P_a ——加权平均后的节点抗剪切能力，kN；

$$P_a = (J_K P_{aK} + J_T P_{aT} + J_X P_{aX}) / (J_K + J_T + J_X) \quad (10.2.2.2 - 2)$$

式中： P_{aK} 、 P_{aT} 、 P_{aX} —— K 、 T 、 X 型节点的抗剪切能力，计算公式参照 SY/T 10030 第 4 章公式选取，并充分考虑强度因子的修正；

J_K 、 J_T 、 J_X —— K 、 T 、 X 型节点百分比。

$$V_{rings} = 2N_r T_r H (0.4 F_{yr} incr) \quad (10.2.2.2 - 3)$$

式中： F_{yr} ——环的屈服强度，Mpa；

N_r ——环的数量；

T_r ——环的厚度，mm；

H ——环的高度，mm；

$incr$ ——许用应力增量，装船工况取 1.0，其他工况取 1.333。

抗剪切应力比如下：

$$SR_{shear} = \frac{P_N}{FLV_{allow}} \quad (10.2.2.2 - 4)$$

10.2.2.3 在硬点处的设计载荷

撑杆传递到弦杆的载荷假设由沿撑杆周长的剪力和轴向力、在硬点处的集中力共同承担，硬点示意图如图 10.2.2.3 所示。

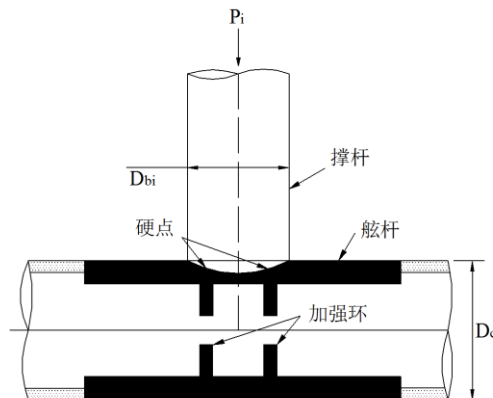


图 10.2.2.3 硬点示意图

在硬点处的设计载荷由下式确定：

$$P_{HP} = \frac{V_{rings}}{V_{rings} + V_{shell}} \left(\frac{P_N}{2N_r} \right) \frac{1}{FL} \quad (10.2.2.3 - 1)$$

注: P_{HP} 用于加强环侧、撑杆侧的腹板屈服和屈曲校核。

10.2.2.4 腹板屈服和屈曲校核

(1) 应在加强环和撑杆两侧分别校核腹板屈服和屈曲能力, 加强环、撑杆侧腹板屈曲和屈服面典型截图如图 10.2.2.4(1)和图 10.2.2.4(2)。

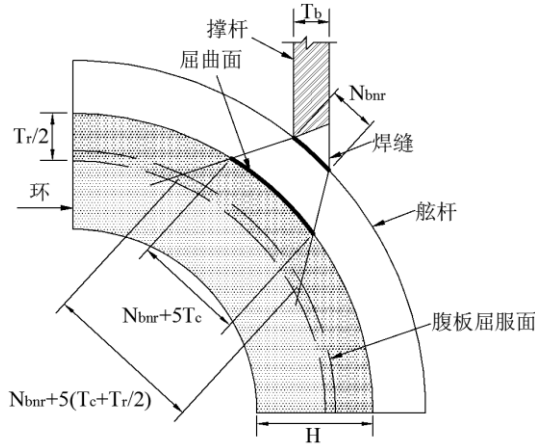


图 10.2.2.4(1) 在加强环侧腹板屈曲和屈服面典型截图

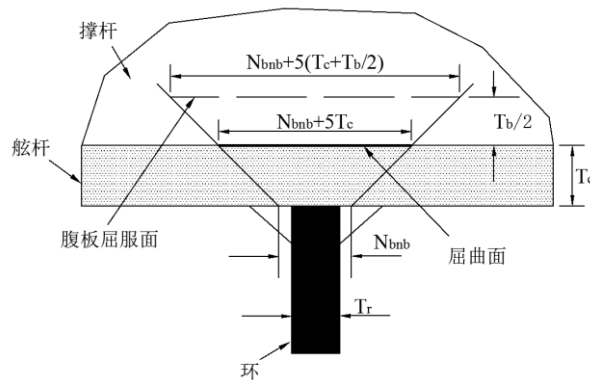


图 10.2.2.4(2) 在撑杆侧腹板屈曲和屈服面典型截图

(2) 腹板屈服校核

① 加强环侧

$$A_{wyr} = T_r \left[1.25T_b + 5 \left(T_c + \frac{T_r}{2} \right) \right] \quad (10.2.2.4 - 1)$$

$$P_{wy\dot{r}} = 0.66F_{yr}A_{wy\dot{r}}Incr \quad (10.2.2.4 - 2)$$

$$SR_{wyr} = \frac{P_{HP}}{P_{wyr}} \quad (10.2.2.4 - 3)$$

式中: A_{wyr} ——加强环侧屈服面积, cm^2 ;

 P_{wyr} ——许用载荷, kN;

SR_{wvr} ——加强环屈服应力比。

② 撑杆侧

$$A_{wyb} = T_b \left[1.5T_r + 5 \left(T_c + \frac{T_b}{2} \right) \right] \quad (10.2.2.4 - 4)$$

$$P_{wyr} = 0.66F_{yb}A_{wyb}Incr \quad (10.2.2.4-5)$$

$$SR_{wyb} = \frac{P_{HP}}{P_{wyb}} \quad (10.2.2.4-6)$$

式中: A_{wyb} ——撑杆侧屈服面积, cm^2 ;

P_{wyb} ——许用载荷, kN ;

SR_{wyb} ——撑杆侧屈服应力比。

(3) 腹板屈曲校核

① 加强环侧

$$N_{bnr} = 1.25T_b \quad (10.2.2.4-7)$$

$$P_{bnr} = 0.4T_r^2 \left(1 + 3 \frac{N_{bnr}}{H} \left(\frac{T_r}{T_c} \right)^{1.5} \right) \sqrt{\frac{EF_{yc}T_c}{T_r}} Incr \quad (10.2.2.4-8)$$

$$SR_{bnr} = \frac{P_{HP}}{P_{bnr}} \quad (10.2.2.4-9)$$

式中: N_{bnr} ——加强环侧最小承载长度, mm , 见图 10.2.2.4(1);

P_{bnr} ——许用载荷, kN ;

SR_{bnr} ——加强环侧局部屈曲应力比;

E ——钢材弹性模量, MPa 。

② 撑杆侧

$$N_{bnb} = 1.5T_r \quad (10.2.2.4-10)$$

$$P_{bnb} = 0.4T_b^2 \left(1 + 3 \frac{N_{bnb}}{D_b} \left(\frac{T_b}{T_c} \right)^{1.5} \right) \sqrt{\frac{EF_{yb}T_c}{T_b}} Incr \quad (10.2.2.4-11)$$

$$SR_{bnb} = \frac{P_{HP}}{P_{bnb}} \quad (10.2.2.4-12)$$

式中: N_{bnb} ——最小承载长度, mm , 见图 10.2.2.4(2);

P_{bnb} ——许用载荷, kN ;

SR_{bnb} ——屈曲应力比。

10.2.2.5 组合截面的轴向和弯曲能力

(1) 按 10.2.2.4 进行局部承载力校核后, 还应对加强环节点的整体承载能力进行校核。假设由组合截面(由弦杆外壁有效长度 L_e 、加强环组成)承担由撑杆传递的载荷, 组合截面和有效长度如图 10.2.2.5(1)所示。

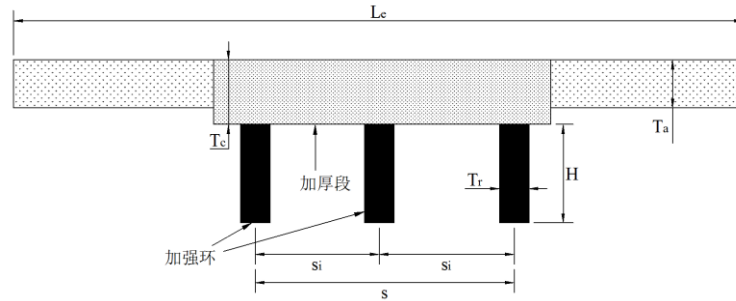


图 10.2.2.5(1) 组合截面和有效长度

有效长度按照下式进行计算:

$$L_e = 1.1(D_c T_c) + s \quad (10.2.2.5-1)$$

(2) 塑性铰的假定位置如图 10.2.2.5(2)所示。

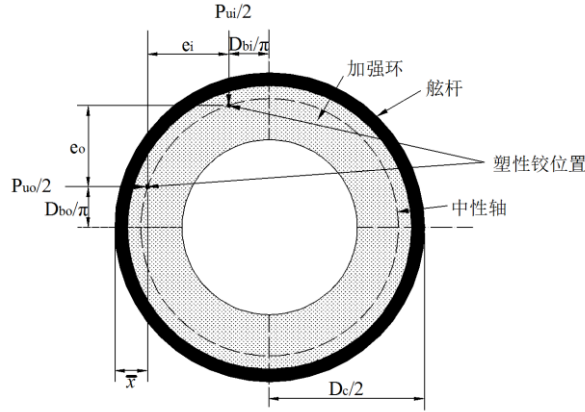


图 10.2.2.5(2) 塑性铰假定位置

(3) 塑性铰间自由体受力情况如图 10.2.2.5(3)所示。

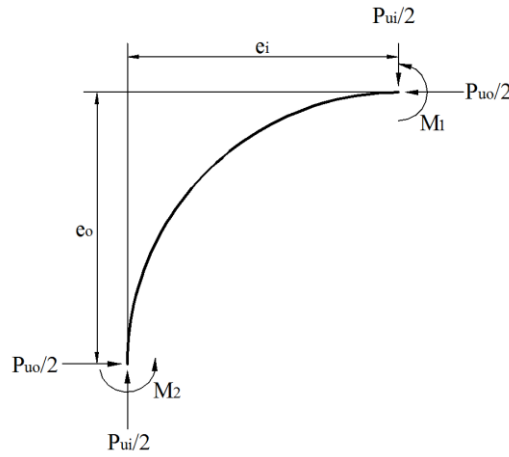


图 10.2.2.5(3) 塑性铰间自由体受力

(4) 组合截面的最大轴向载荷由下式定义：

$$P_{max} = m a x(P_{ui}, P_{uo}) \quad (10.2.2.5 - 2)$$

(5) 弦杆的极限轴向承载能力为：

$$P_{ult} = N_r T_r F_{yr} H + L_e T_c F_{yc} \quad (10.2.2.5 - 3)$$

式中：\$N_r\$——加强环数量；

\$T_r\$——加强环厚度，mm；

\$F_{yr}\$——加强环屈服强度，Mpa；

\$H\$——加强环厚度，mm；

\$F_{yc}\$——弦杆屈服强度，Mpa。

(6) 弦杆内轴向载荷应力比：

$$SR_{axial} = \frac{P_{max}}{P_{ult}} \quad (10.2.2.5 - 4)$$

(7) 图 10.2.2.5(3)中的离心率 \$e_i\$ 和 \$e_o\$ 按照下式计算：

$$e_i = \frac{D_c}{2} - \frac{D_{bi}}{\pi} - \bar{x} \quad (10.2.2.5 - 5)$$

$$e_o = \frac{D_c}{2} - \frac{D_{bo}}{\pi} - \bar{x} \quad (10.2.2.5-6)$$

式中： $\bar{x}$ ——按照式 (10.2.2.5-8) 或 (10.2.2.5-9) 选取。

(8) 最大弯矩由下式定义：

$$M_{max} = M_1 + M_2 = \frac{P_{ui}}{2} e_i - \frac{P_{uo}}{2} e_o \quad (10.2.2.5-7)$$

注：当 P_{ui} 和 P_{uo} 同号时，出于保守考虑，上式第二项可以忽略。

(9) T 型截面的极限抗弯能力采用塑性分析方法，塑性分析的 T 型截面如图 10.2.2.5(4) 所示。

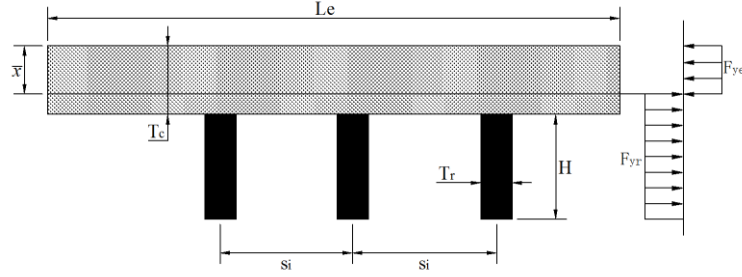


图 10.2.2.5(4) 塑性分析的 T 型截面

$$\bar{x}_1 = \frac{HN_r T_r F_{yr} + L_e T_c F_{yc}}{2L_e F_{yc}} \quad (10.2.2.5-8)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{(2T_c + H)N_r T_r F_{yr} - L_e T_c F_{yc}}{2N_r T_r F_{yr}} \quad (10.2.2.5-9)$$

当 $\bar{x}_1 \leq T_c$

$$\bar{x} = \bar{x}_1 \quad (10.2.2.5-10)$$

(10) 极限抗弯能力按照下式计算：

$$M_u = \frac{L_e F_{yc} \bar{x}^2}{2} + \frac{L_e F_{yc}}{2} (T_c - \bar{x})^2 + HN_r T_r F_{yr} \left(\frac{H}{2} + T_c - \bar{x} \right) \quad (10.2.2.5-11)$$

当 $\bar{x}_1 \geq T_c$

$$\bar{x} = \bar{x}_2 \quad (10.2.2.5-12)$$

(11) 极限抗弯能力按照下式计算：

$$M_u = \left(\frac{N_r T_r F_{yr}}{2} \right) (\bar{x} - T_c)^2 + \frac{N_r T_r F_{yr}}{2} (H + T_c - \bar{x})^2 + L_e T_c F_{yc} \left(\bar{x} - \frac{T_c}{2} \right) \quad (10.2.2.5-13)$$

(12) 全塑性整体抗弯能力参照下式确定：

$$M_{ucap} = M_{(1)} + M_{(2)} = 2M_u \quad (10.2.2.5-14)$$

$$SR_{mu} = \frac{M_{max}}{M_{ucap}^{incr}} \quad (10.2.2.5-15)$$

(13) 轴向和弯矩能力联合应力比为：

$$SR_{comb} = SR_{axial} + \frac{SR_{mu}}{1.18} \quad (10.2.2.5-16)$$

10.2.2.6 加强环节节点整体压溃校核

下水腿节点除满足本节 10.2.2.2~10.2.2.5 要求外，装船、运输、下水工况还应对下水腿加强环节节点整体压溃进行校核，校核方法按照 10.2.2.5 执行，但需要基于如下假定：

(1) 如果节点包括一个以上的节点加强环，应选用最小惯性矩的节点加强环进行整体压

溃校核，并考虑加强环数量；

- (2) 按照公式 (10.2.2.5-1) 确定的有效长度 L_e 超过加厚段 L_c 长度时， L_e 取 L_c 值；
- (3) 设计横向载荷为同侧所有撑杆的横向载荷之和；
- (4) 撑杆等效直径基于每个撑杆横向载荷 ($P \sin \theta$) 的加权平均。

第 3 节 裙桩套筒及连接结构局部强度分析

10.3.1 一般要求

10.3.1.1 应采用经认可的通用工程软件进行裙桩套筒及连接结构的局部强度分析。

10.3.2 有限元模型

10.3.2.1 应根据深水导管架平台的对称关系，选取典型的裙桩套筒及连接结构建立局部有限元模型，如选取对角位置的裙桩套筒及连接结构。

10.3.2.2 局部有限元模型应包括环形板、剪切板、裙桩套筒、钢桩、裙桩套筒与钢桩之间的水泥浆、加强环、主腿、斜撑等结构。

10.3.2.3 局部有限元模型应以整体结构模型中的桩头点为分界，通过施加桩头载荷考虑泥面以上结构的局部强度。

10.3.2.4 在整体结构模型中，裙桩套筒附近的主腿和斜撑应在合适的位置进行打断。打断处节点位移作为边界施加到局部有限元模型中，打断长度应确保不影响局部分析的准确性。

10.3.2.5 宜采用壳单元模拟钢结构，采用实体单元模拟水泥浆结构。壳单元尺寸建议综合考虑壁厚等因素的影响，通常不宜超过 4 倍壁厚。

10.3.2.6 应根据整体结构分析中的裙桩桩头载荷总和确定局部强度分析所需考虑的情况。

10.3.2.7 由于裙桩套筒及连接结构刚度较大，一般不会发生大变形情况，因此分析过程可以忽略几何非线性。

10.3.2.8 当仅局部热点 VON-MISES 应力超过材料屈服强度时，分析过程可以忽略材料非线性。

10.3.3 强度校核准则

10.3.3.1 板单元的屈服强度校核参照 CCS《海上移动平台入级规范》第 2 篇第 3 章 3.4.2.2 的要求。

10.3.3.2 对于局部高应力区的板单元屈服强度校核，其许用应力可在材料屈服强度的基础上增加 10%，且局部高应力区面积建议不超过所考虑面积的 10%。

10.3.3.3 板单元的屈曲强度校核参照 CCS《海上移动平台入级规范》第 2 篇第 3 章 3.4.7 的要求。

第 4 节 涡激振动

10.4.1 一般要求

10.4.1.1 由于涡脱落，风、流及其他任何流经结构构件的流体，都有可能造成非定常的流态。这可能引起细长单元产生垂直于其纵轴的振动。

10.4.1.2 涡激振动对细长构件的影响：

- (1) 由于涡激振动，系统可能遭受严重的疲劳损伤；
- (2) 可能增加杆件平均拖曳力系数，影响该杆件的整体分析，并对其他杆件的分析造成影响；

(3) 可能影响圆柱体阵列的尾流诱导振动（WIO）（起始和振幅）；

(4) 可能对两个相邻圆柱体的相对碰撞速度有显著影响。

10.4.1.3 导管架的涡激振动，需要考虑包括但不限于以下工况：

- (1) 场地建造；
- (2) 拖航运输；
- (3) 导管架在位。

10.4.1.4 水下杆件既要考虑没有海生物的情况，也要考虑有海生物的情况。

10.4.1.5 深水导管架应尽量避免杆件出现涡激振动。

10.4.2 基本概念和定义

10.4.2.1 固有频率

结构一阶模态固有频率计算如下：

$$f_n = \frac{(1.59\phi + \pi)^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m_e}} \quad (10.4.2.1 - 1)$$

式中：

ϕ ——杆件端点自由度；

$\phi = 1.0$ ，固支-固支；

$\phi = 0.5$ ，固支-铰支；

$\phi = 0.0$ ，铰支-铰支；

$\phi = 0.7$ ，两端熔透焊管节点；

m_e ——构件单位长度上的有效质量，kg/m；

E ——弹性模量；

L ——杆件长度；

I ——杆件截面惯性矩。

10.4.2.2 有效质量

构件单位长度有效质量定义如下：

$$m_e = \frac{\int_L m[y(x)]^2 dx}{\int_L [y(x)]^2 dx} \quad (10.4.2.2 - 1)$$

10.4.2.3 定常流或 K_C 数大于 40 的流动中，涡脱落频率可按下式计算：

$$f_s = S_t \frac{u}{D} \quad (10.4.2.3 - 1)$$

式中：

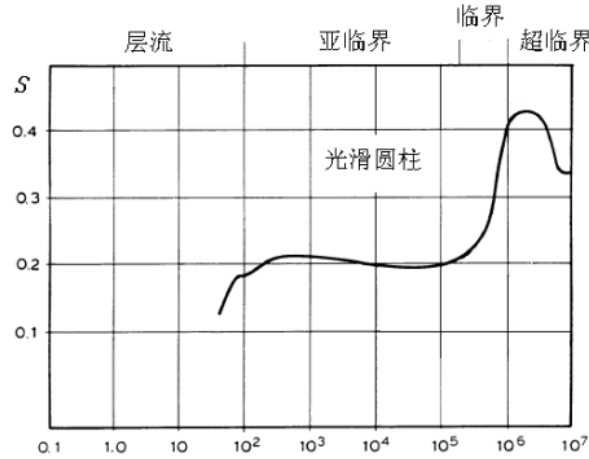
f_s ——涡脱落频率，Hz；

S_t ——斯特罗哈数；

u ——垂直于构件轴向的流体速度，m/s；

D ——构件直径，m。

对于光滑的静止圆柱，斯特罗哈数（ S_t ）是雷诺数（ Re ）的函数，二者关系由下图确定：

图 10.4.2.3 $St-Re$ 关系

对于粗糙表面圆柱或者振动中的圆柱（不论表面光滑还是粗糙），斯特罗哈数（ St ）对雷诺数（ Re ）相对不敏感。

10.4.2.4 涡激振动可以分解为横流（cross flow）和线内（in-line）运动：

- (1) 横流（CF）振动，振幅大约为 1 倍直径；
- (2) 纯线内（IL）振动，振幅大约为 10%~15% 直径；
- (3) 横流诱导线内振动，振幅大约为 30%~50% 的横流振幅；
- (4) 在最低的折减速度下可能会发生纯线内运动，当速度足够大而产生横流（以及横流诱导的线内）响应时，通常不再关注纯线内运动，因为此时其相应幅值较小。

10.4.2.5 折减速度

定义一个参数 V_R （折减速度），来确定旋涡脱落与构件固有频率产生共振的速度范围：

$$V_R = \frac{u}{f_i D} \quad (10.4.2.5 - 1)$$

式中：

- u —— $u(x)$ ，垂直于构件轴向的瞬时流体速度，m/s；
- f_i —— 构件的 i 阶固有频率，Hz；
- D —— $D(x)$ ，构件直径，m；
- x —— 沿构件轴向的距离，m。

10.4.2.6 质量比

质量比用来度量浮力和质量对模型影响的相对重要性，定义如下：

$$m^* = \frac{m}{\pi \rho D^2 / 4} \quad (10.4.2.6 - 1)$$

低质量比的频率锁定范围比高质量比的更大，这是由于附加质量对于结构质量的贡献相对更大。通常对于低质量比（如立管、管道等）涡激振动发生在 $3 < V_R < 16$ 的折减速度范围内，对于高质量比（暴露在风中的结构）涡激振动发生在 $4 < V_R < 8$ 的折减速度范围内。

10.4.2.7 结构阻尼

结构阻尼由构件材料的内摩擦力引起，其大小取决于应变水平和相关挠度。对于暴露在风中的钢质构件，若无其他可用信息，结构阻尼比（ $\delta_s / 2\pi$ ）可取为 0.0015。对于水中的细长构件，适度变形下的结构阻尼通常介于 0.005（纯钢管）到 0.03~0.04（柔性管）之间。

10.4.3 风致涡脱落

10.4.3.1 风激振动分析中，计算风速做如下规定：

(1) 拖航运输中，计算风速应为拖航路径重现期 10 年的海平面以上 10 m 处的 1 分钟平均风速；

(2) 在位分析中，计算风速应为场地重现期 1 年的海平面以上 10 m 处的 1 分钟平均风速；

(3) 计算风速要考虑高度系数的影响。

10.4.3.2 对于圆管，风激振动可能发生在两个平面，与风向一致的平面（线 in-line）或者垂直于风向的平面（横流 cross-flow）。

10.4.3.3 折减风速在以下范围内，可能发生线内风激振动：

$$\frac{0.3}{St} < V_R < \frac{0.65}{St} \quad (10.4.3.3 - 1)$$

式中：

V_R —— 折减速度；

St —— 斯特罗哈数；

线内振动可能只发生在小稳定性参数下，即 $K_S < 2$ 。

10.4.3.4 折减风速在以下范围内，可能发生横流风激振动：

$$\frac{0.8}{St} < V_R < \frac{1.6}{St} \quad (10.4.3.4 - 1)$$

10.4.4 流致涡脱落

10.4.4.1 线内和横流振动要分开考虑。此处描述的响应模型主要用于单模态锁定情况。

10.4.4.2 线内涡激振动

线内涡脱落可能在以下情况下发生：

$$1.0 \leq V_R \leq 4.5 \quad (10.4.4.2 - 1)$$

10.4.4.3 横流涡激振动

在下述情况下，可能存在横流涡脱落：

$$3 \leq V_R \leq 16, \text{ 对于所有雷诺数} \quad (10.4.4.3 - 1)$$

第 5 节 波浪砰击

10.5.1 一般要求

10.5.1.1 当波浪穿过位于飞溅区的水平杆件时会造成近乎垂直的砰击荷载作用，砰击荷载对平台的总体基底剪力和倾覆力矩的作用非常小，但对局部杆件会造成一定的影响，应予以考虑。

10.5.1.2 平台拖航时，悬出驳船边缘的杆件，或导管架下水时首先入水的杆件，也可能产生冲击力，应保证这些构件局部具有足够的强度。

10.5.1.3 对于极端波浪力引起的砰击荷载，应考虑构件的强度要求，对于长期波浪作用引起的砰击荷载，应考虑对构件疲劳的影响。

10.5.1.4 计算的砰击荷载将与波向最接近的在位极端风暴分析得到的荷载进行组合。杆件和节点校核的许用应力可增加 1/3。

10.5.2 砰击荷载

10.5.2.1 砰击荷载是由拍击在构件上的水质点的相对拍击速度所引起，相对拍击速度取决于结构的运动、波高、波浪周期、波浪方向和构件位置。

10.5.2.2 拍击速度由计算程序输出的波浪剖面及水质点速度得到，将水深在最大和最小水深之间调整，以便得到作用在构件上的最大拍击速度。

10.5.2.3 波浪拍击构件的角度由适当的水平及垂直水质点速度得到，水平水质点速度应考虑流速的效应。

10.5.2.4 管状构件单位长度的拍击荷载 W_S 由公式(10.5.2.4-1)计算。

$$W_S = C_S(w/2g)DU^2 \quad (10.5.2.4 - 1)$$

式中：

D ——构件直径， w 为水的重度， g 为重力加速度， U 为水质点拍击速度；

C_S ——拍击系数，如果进行了动力分析，可以使用 $C_S = \pi$ ，否则取 $C_S = 5.5$ 。

附录 A 结构模型的节点编号和杆件分组规则

第 1 节 节点编号的设置规则

A.1.1 一般要求

A.1.1.1 平台模型的节点编号宜采用本节的规则进行设置，以反映结构的分类和位置等信息。

A.1.1.2 导管架的节点编号第一位字符代表结构类型信息，L 代表主腿节点，H 代表水平撑节点，X 代表斜拉筋，T 代表下水架节点；第二位字符代表水平层信息，从工作点层及往下各水平层分别为 0，1，2，3……。。

A.1.1.3 上部组块的节点编号第一位字符设置成 D，第二个字符代表水平层信息，工作点以上的各水平层分别为 1，2，3……。对于组块较大平台，节点编号不够使用时，第二个字符可用多个序号代表同一水平层，如第一层用 D1/D2/D3 序号，第二层用 D4/D5/D6 依次类推。

A.1.1.4 生活楼的节点编号可参照上部组块的命名规则进行设置，第一位字符设置成 Q。

A.1.1.5 立管、护管等结构的节点，第一位字符设置为 J，第二位字符为立管、护管的编号，例如 J2xx 为 2#护管的某节点。

A.1.1.6 隔水套管的节点第一位字符设置为 C；隔水套管处的 WISHBONE 单元节点的第一位字符设置为 W；火炬臂的节点第一位字符设置为 F；靠船件的节点第一位字符设置为 B；防沉板的节点第一位字符设置为 M；裙桩套筒的节点第一位字符设置为 S；其他结构节点第一个字符设置为 A。

第 2 节 杆件和板单元分组编号的设置规则

A.2.1 一般要求

A.2.1.1 平台模型杆件的分组（group）编号宜采用本节的规则进行设置，以反映杆件的位置、截面、类型等信息。尽可能的令导管架主结构的每根物理杆件具有独立的分组编号，各类杆件的分组编号要求见表 A.2.1.1（1） - （3）。

A.2.1.2 采用板单元模拟上部组块的甲板板材，根据板厚不同，设置板单元的分组编号为 PL1，PL2，PL3……。。

导管架结构的分组编号规则 表 A.2.1.1（1）

结构类型	首字符	第二位字符	第三位字符
主腿	L	顺序取号	顺序取号
腿内桩	P	I	顺序取号
裙桩	S	K	顺序取号
水平拉筋	H	顺序取号	顺序取号
斜拉筋	X	顺序取号	顺序取号
靠船件	B	B	顺序取号
立管	R	S	顺序取号
立管支撑	R	U	顺序取号
J 型管	J	T	顺序取号

J 型管支撑	J	U	顺序取号
泵护管	P	M	顺序取号
泵护管支撑	P	U	顺序取号
护管处导向	P	G	顺序取号
防沉板	M	D	顺序取号
裙桩套筒	S	L	顺序取号

上部组块主结构的分组编号规则

表 A.2.1.1 (2)

结构类型	首字符	第二位字符	第三位字符
主腿	D	顺序取号	顺序取号
主梁	M	顺序取号	顺序取号
次梁	I	顺序取号	顺序取号
斜撑	V	顺序取号	顺序取号
火炬臂	F	顺序取号	顺序取号
生活楼	Q	顺序取号	顺序取号
楼梯等其他附件	A	顺序取号	顺序取号

其他结构的分组编号规则

表 A.2.1.1 (3)

结构类型	首字符	第二位字符	第三位字符
隔水套管	C	N	顺序取号
隔水套管与水平撑的连接结构	W.B, 对于不同尺寸隔水套管, 取 WB1、WB2....		
桩腿间的楔块连接	W.P		