

離岸風機下部基礎結構營運期間之 結構安全議題探討

簡報

簡報人：吳念祖

簡歷

學歷

國立成功大學／水利系／學士／71年畢

美國德拉瓦大學／土木工程研究所海洋工程組／碩士／76年畢

德國漢諾威大學／ Franzius水利及海岸工程研究所／博士／83年畢

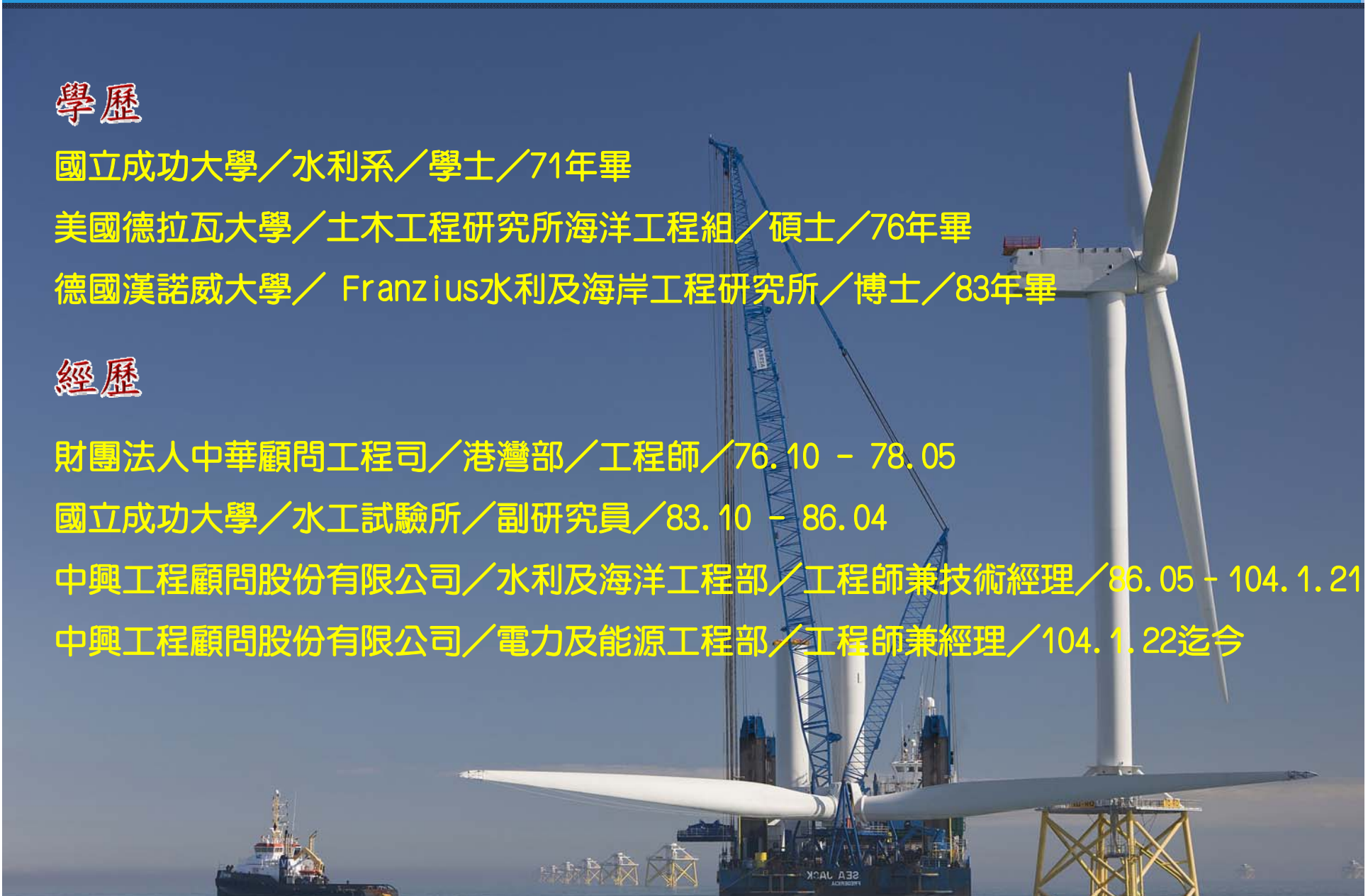
經歷

財團法人中華顧問工程司／港灣部／工程師／76.10 - 78.05

國立成功大學／水工試驗所／副研究員／83.10 - 86.04

中興工程顧問股份有限公司／水利及海洋工程部／工程師兼技術經理／86.05 - 104.1.21

中興工程顧問股份有限公司／電力及能源工程部／工程師兼經理／104.1.22迄今



簡報大綱

一、概述

二、影響下部基礎安全要素

三、運維須注意之關鍵課題

四、因應策略



簡報大綱

一、概述

二、影響下部基礎安全要素

三、運維須注意之關鍵課題

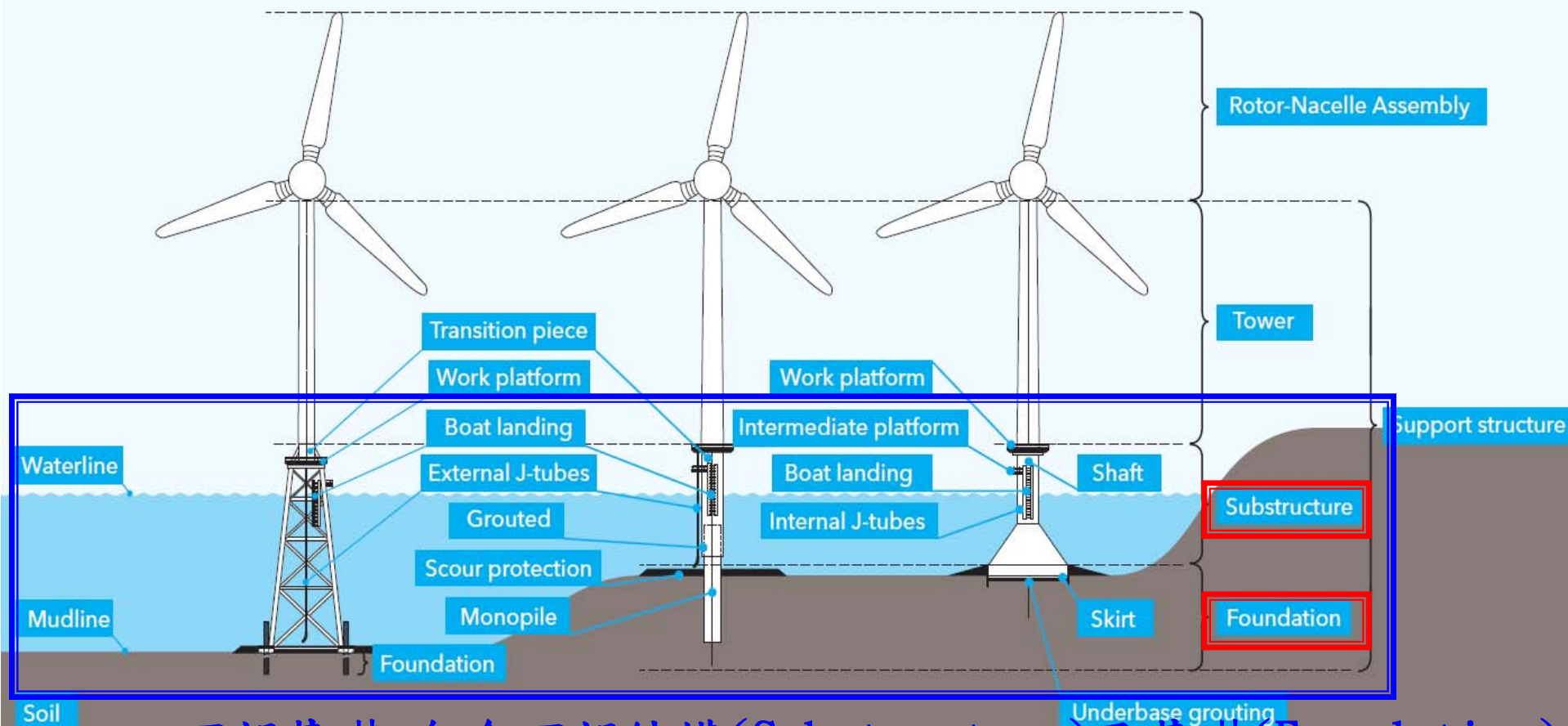
四、因應策略



下部基礎定義

概述

◆依DNVGL-ST-0126-Edition April 2016 定義



下部基礎: 包含下部結構(Substructure)及基礎(Foundation)

主要離岸風機下部結構型式

概述

單樁式基礎



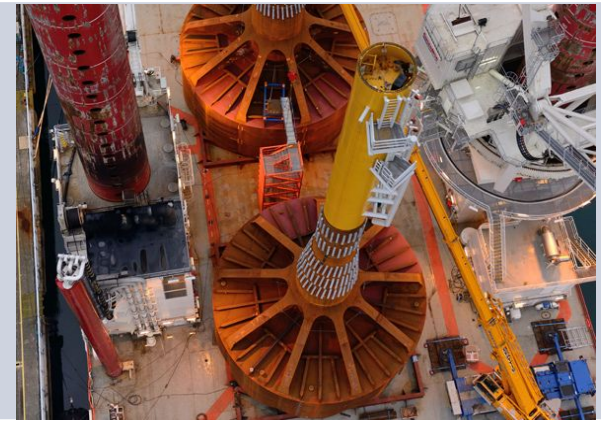
適用水深：0-25m

重力式基礎



適用水深：0-25m

沉吸式基礎



適用水深：0-10m

三樁式基礎



適用水深：10-40m

三腳架式基礎



適用水深：10-40m

套筒式基礎



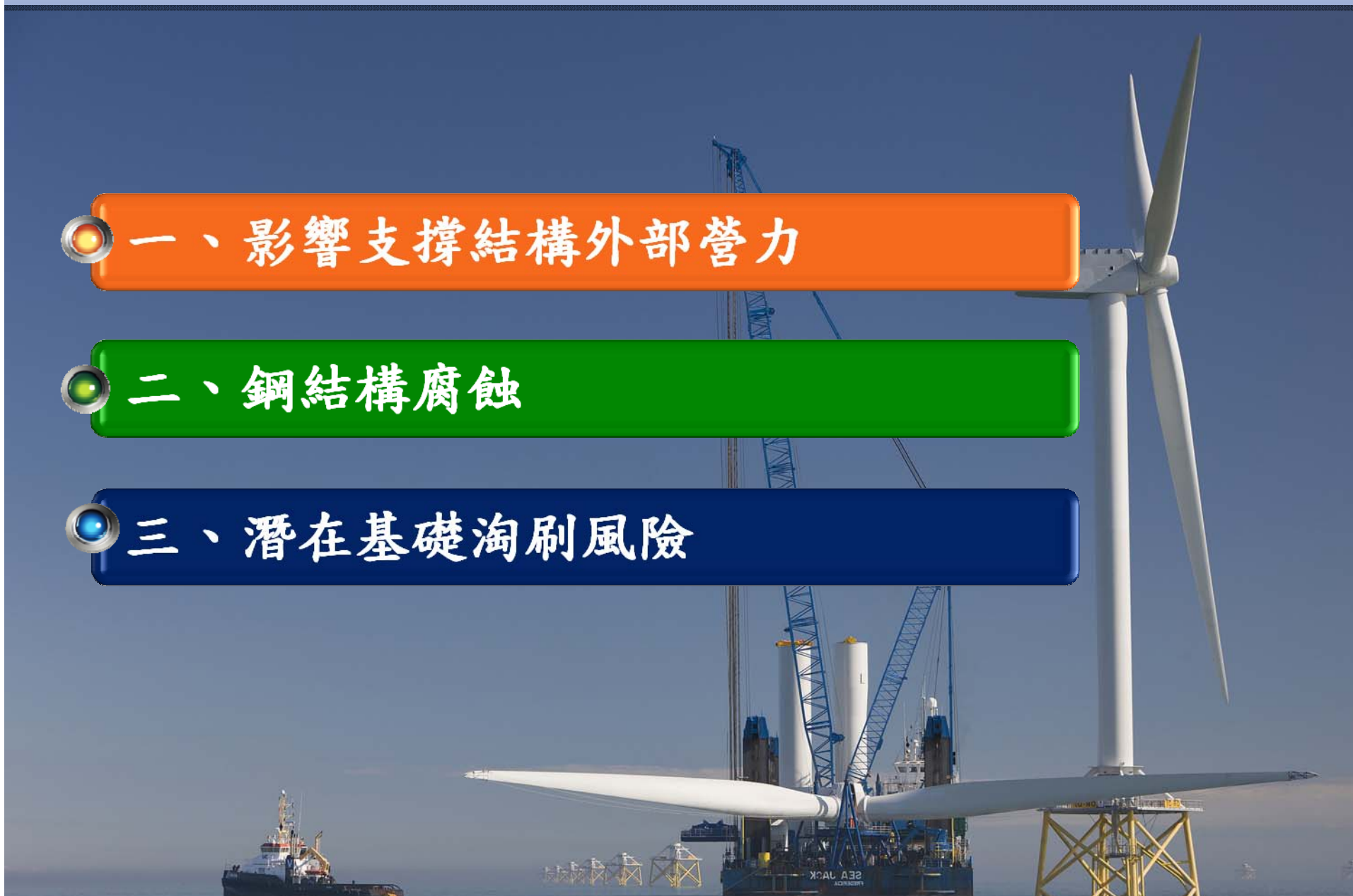
適用水深：25-40m

影響下部基礎安全要素

一、影響支撐結構外部營力

二、鋼結構腐蝕

三、潛在基礎淘刷風險



影響下部基礎安全要素

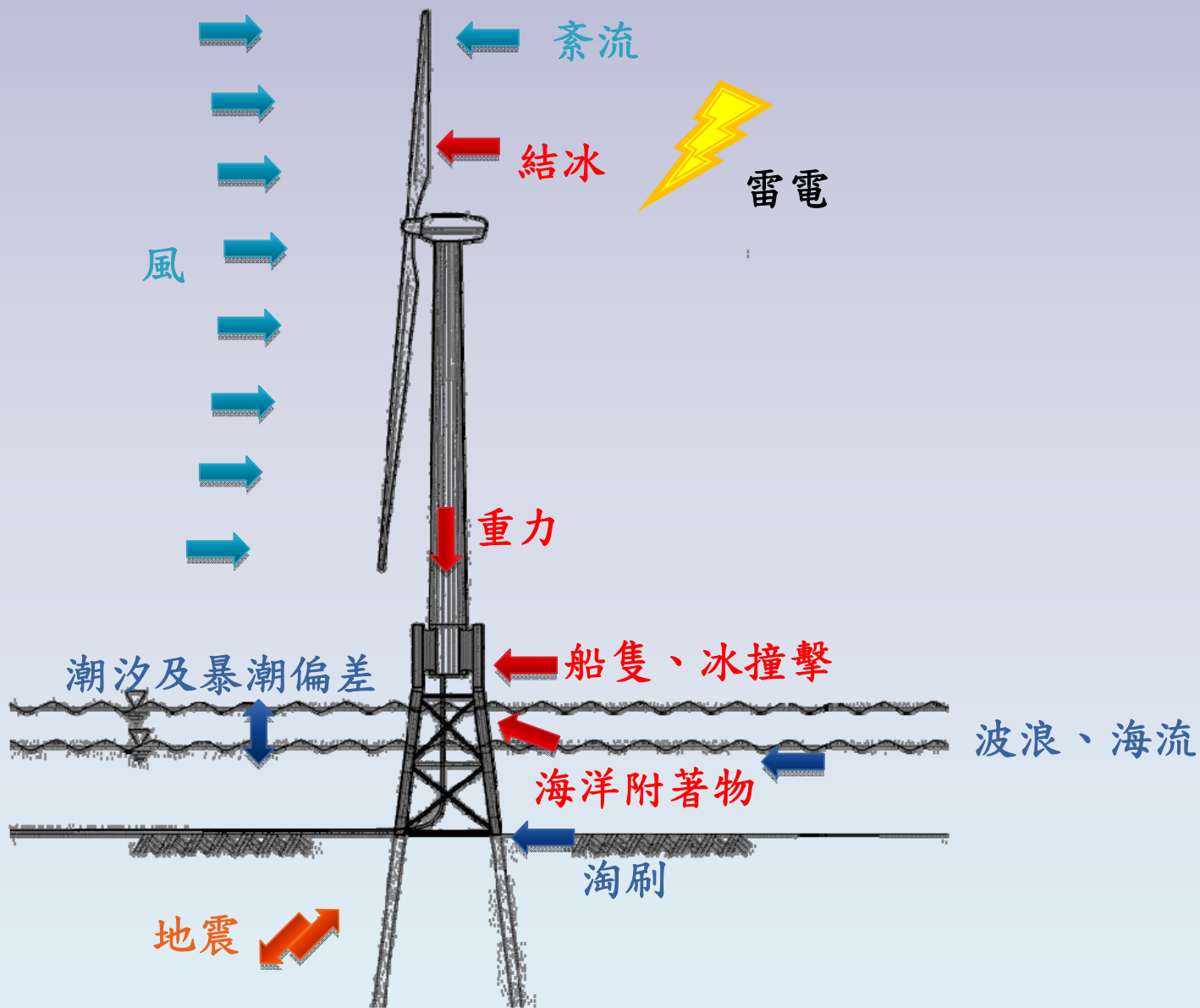
一、風機支撐結構之外部營力

二、鋼結構腐蝕

三、潛在基礎淘刷風險



風機支撐結構之外部營力



風機支撐結構之外部營力

影響安全之要素



遭受巨浪導致結構損毀

離岸結構承受強大的反覆波浪載重



影響下部基礎安全要素

一、風機支撐結構外部營力

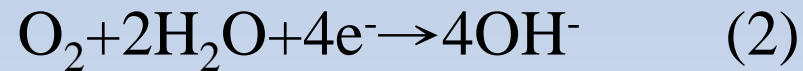
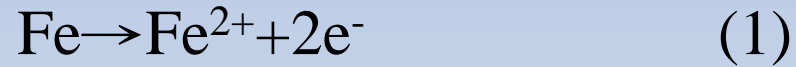
二、鋼結構腐蝕

三、潛在基礎淘刷風險



鋼結構腐蝕

▶ 腐蝕機制



Fe(OH)₂易於水中產生化學反應生成Fe₂O₃·H₂O，俗稱鐵鏽。



(1)

(2)

(3)

(1) [http:// www.abfad.co.uk](http://www.abfad.co.uk)

(2) <http://www.3deducators.com>

(3) <http://www.gateinc.com/>

鋼結構腐蝕

▶ 腐蝕環境-大氣腐蝕

- 根據ISO9223(CNS 13401)分類

大氣腐蝕環境分類-以各種標準金屬最初第一年之腐蝕速率區分					
腐蝕環境 分類	腐蝕速率 單位	碳鋼	鋅	銅	鋁
C1	g/m ² /yr μm/yr	$\gamma_{\text{corr}} \leq 10$ $\gamma_{\text{corr}} \leq 1.3$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.7$ $\gamma_{\text{corr}} \leq 0.1$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.9$ $\gamma_{\text{corr}} \leq 0.1$	可忽視 —
C2	g/ m ² /yr μm/yr	$10 < \gamma_{\text{corr}} \leq 200$ $1.3 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$	$0.7 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$ $0.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 0.7$	$0.9 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$ $0.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 0.6$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.6$ —
C3	g/ m ² /yr μm/yr	$200 < \gamma_{\text{corr}} \leq 400$ $25 < \gamma_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 15$ $0.7 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2.1$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 12$ $0.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 1.3$	$0.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2$ —
C4	g/ m ² /yr μm/yr	$400 < \gamma_{\text{corr}} \leq 650$ $50 < \gamma_{\text{corr}} \leq 80$	$15 < \gamma_{\text{corr}} \leq 30$ $2.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 4.2$	$12 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$ $1.3 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2.8$	$2 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$ —
C5	g/ m ² /yr μm/yr	$650 < \gamma_{\text{corr}} \leq 1500$ $80 < \gamma_{\text{corr}} \leq 200$	$30 < \gamma_{\text{corr}} \leq 60$ $4.2 < \gamma_{\text{corr}} \leq 8.4$	$25 < \gamma_{\text{corr}} \leq 50$ $2.8 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5.6$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 10$ —

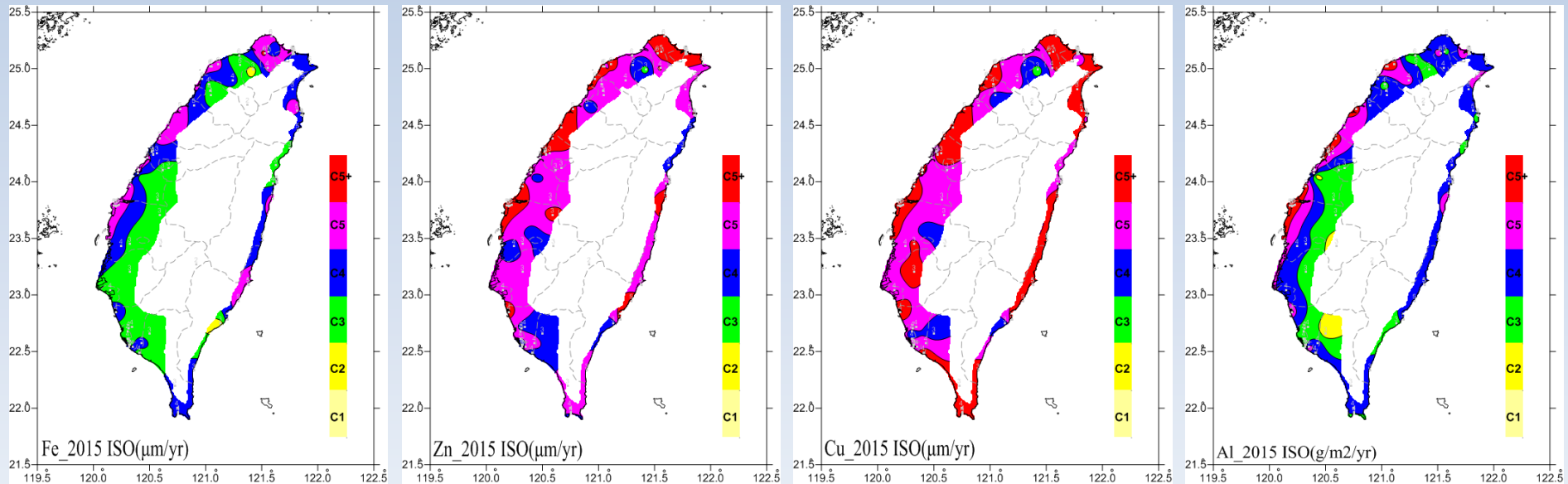
資料來源：CNS 13401, ISO 9223

鋼結構腐蝕



▶ 腐蝕環境-大氣腐蝕

- 2015年各標準金屬大氣腐蝕環境分類實驗結果



鐵年腐蝕分類

鋅年腐蝕分類

銅年腐蝕分類

鋁年腐蝕分類

離岸風機下部基礎面臨嚴峻的大氣腐蝕環境

鋼結構腐蝕



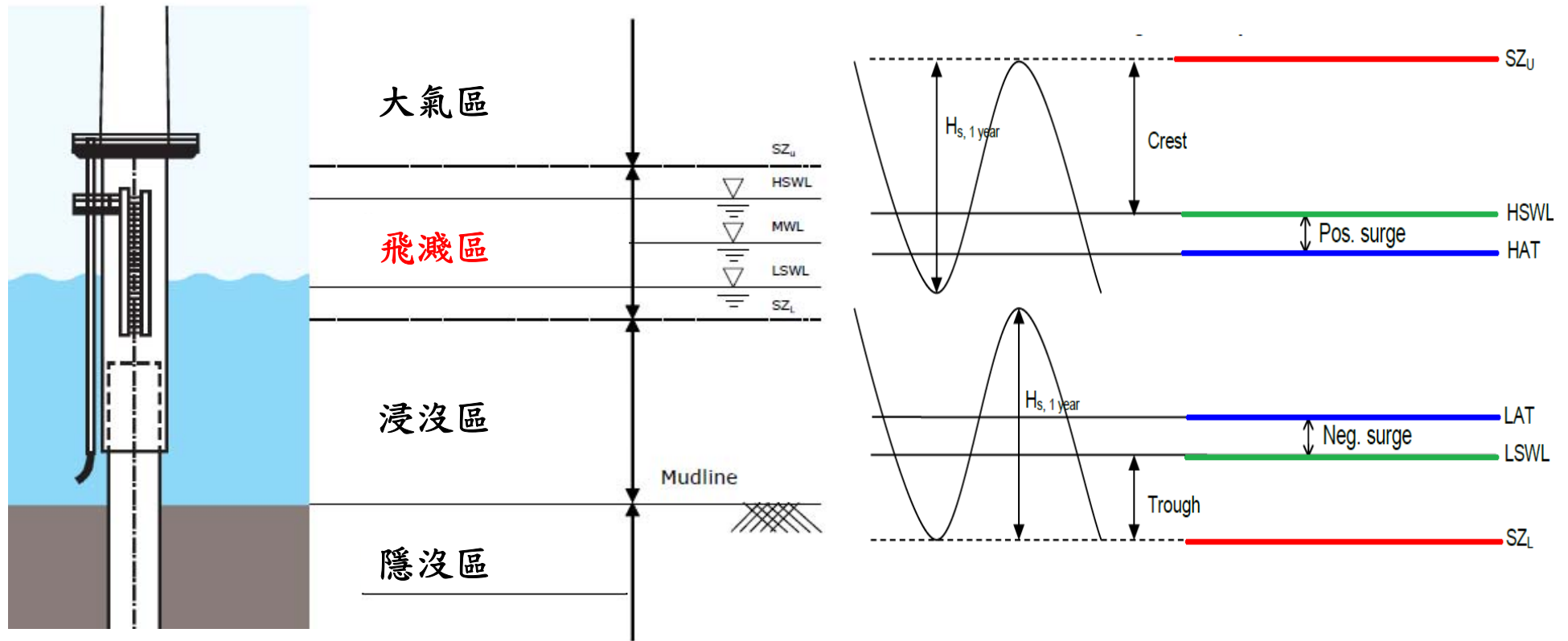
▶ 腐蝕環境-水下腐蝕

水下腐蝕影響因素	說明
溶氧量	海水中氧含量越高，其 溶解速度越快 ， 腐蝕現象越劇烈
鹽度	海水成分中含有高量的鹽度，該 高鹽度易導致鋼構造發生腐蝕
海流流速	當海水對金屬的相對流速增大時，溶解氧向陰極擴散得更快，將使金屬的腐蝕速度增加，形成與流體相同流向之 凹槽、蝕孔 等。
潮汐	海洋因引力產生潮汐現象，於潮汐水位之間的區域，含大量的水分和鹽分，該區域之含氧量充裕，均為鋼構造腐蝕之誘因
溫度	水溫越高，其腐蝕越劇烈 ；但溫度越高，其海水溶氧量越低，兩者呈現互相對比
海生附著物	不同海生物附著物對於腐蝕會造成不同影響，通常 海生附著物代謝物或屍體含有硫化氫等酸性成分 ，加劇鋼構造的腐蝕反應。

鋼結構腐蝕



▶ DNVGL-RP-0416 Edition March 2016



飛濺區定義

飛濺區上界線 = 最高高潮位 + 1年復現期之暴潮差 + 0.65 × 1年復現期之有義波高
 飛濺區下界線 = 最低低潮位 - 1年復現期之暴潮差 - 0.35 × 1年復現期之有義波高

鋼結構腐蝕



▶ 防蝕保護機制 (DNVGL-RP-0416 Edition March 2016)

○ 塗裝系統

- NORSOK M-501
- EN ISO 12944

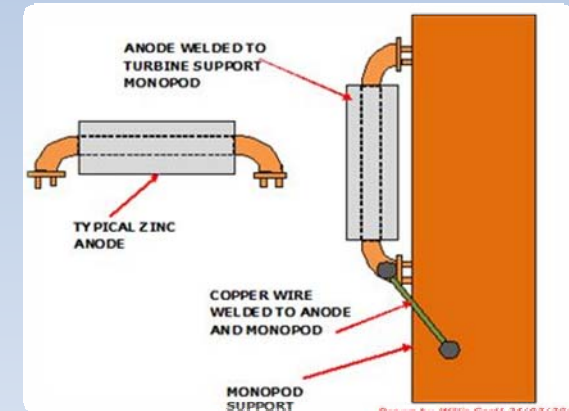
○ 犧牲陽極塊(外加電流)

- DNV-RP-B401
- NACE RP 0387

○ 腐蝕餘裕



(1)



(2)

(1) <http://www.sundialpowdercoating.com>(2) <http://www.brighthub.com>

適用區域	腐蝕速率(外表面)	腐蝕速率(外表面)
海水年均溫度 $\leq 12^{\circ}\text{C}$	0.3 mm/yr	0.1 mm/yr
亞熱帶、熱帶區	0.4 mm/yr	0.2 mm/yr

➔ 腐蝕餘裕 = 腐蝕速率 × (設計年限 - 塗裝設計年限)

影響下部基礎安全要素

一、風機支撐結構外部營力

二、鋼結構腐蝕

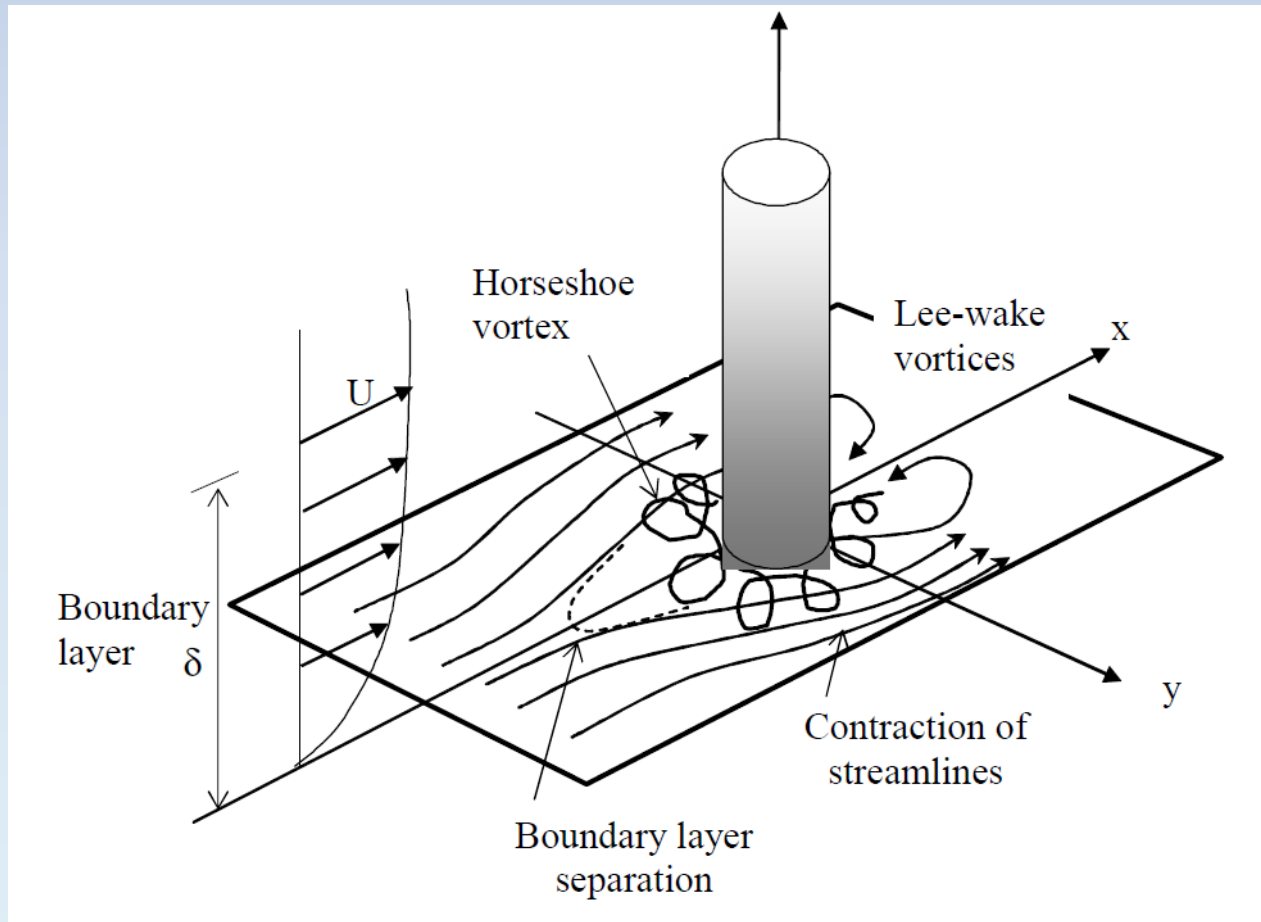
三、潛在基礎淘刷風險



潛在基礎淘刷風險

▶ 淘刷機制

- 近底床流速的局部加速度變化或紊流(渦漩)引致局部輸沙能力增強



潛在基礎淘刷風險

淘刷深度

$$\frac{S}{D} = 1.3[1 - e^{-0.03(KC-6)}] \quad KC \geq 6$$

$$KC = \frac{u_{\max} \cdot T}{D}$$

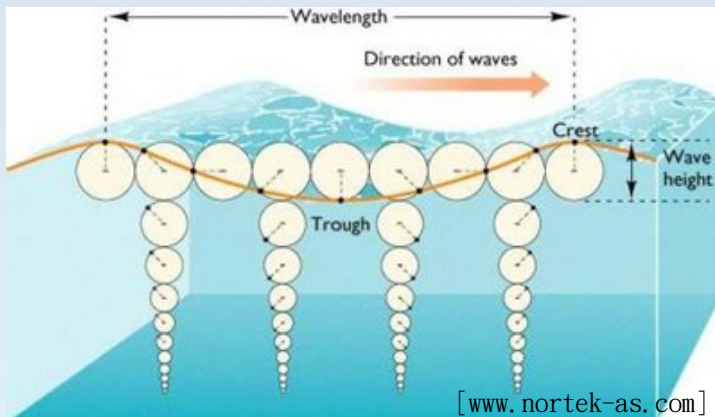
S : 淘刷深度

KC : Keulegan-Carpenter number

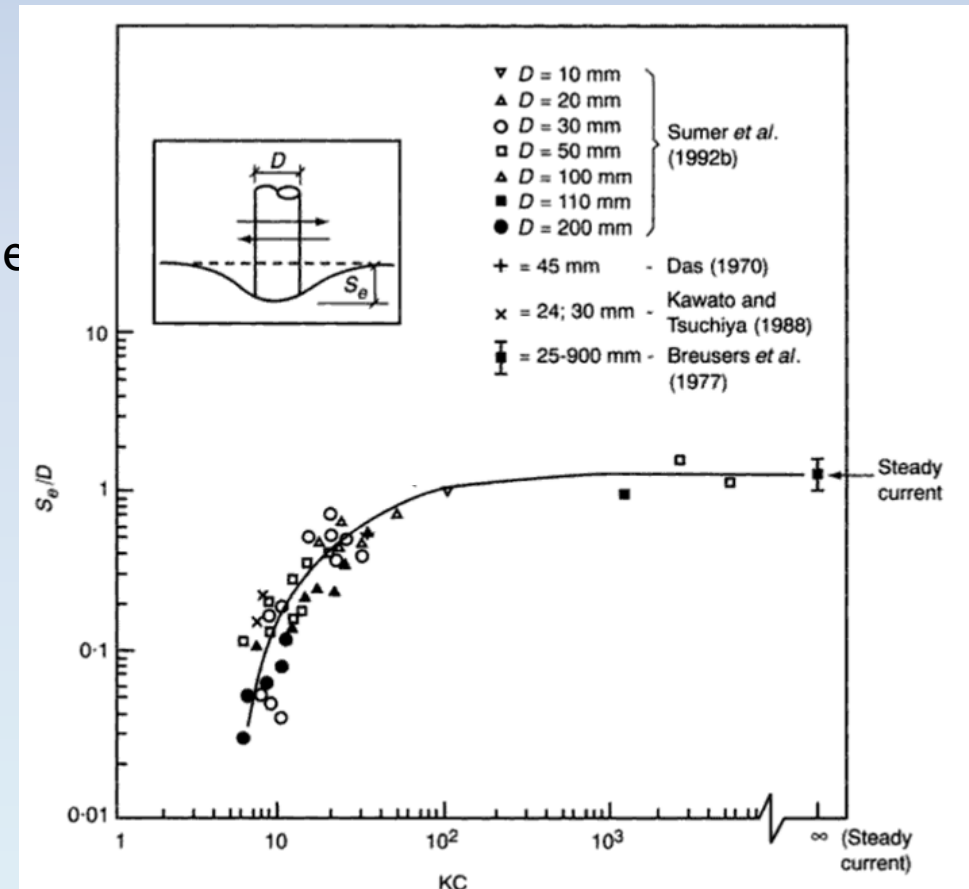
D : 樁徑

u_{\max} : 底床處最大水分子流速

T : 波浪週期



[www.nortek-as.com]



[Whitehouse, *Scour at marine structure*, 1998]

潛在基礎淘刷風險

影響安全之要素

淘刷範圍

$$r = \frac{D}{2} + \frac{S}{\tan \phi}$$

r : 淘刷半徑

S : 淘刷深度

D : 樁徑

ϕ : 土壤摩擦角

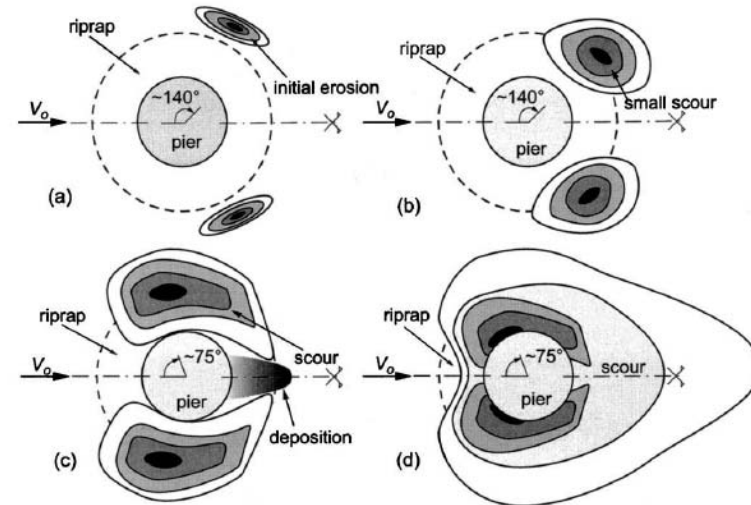
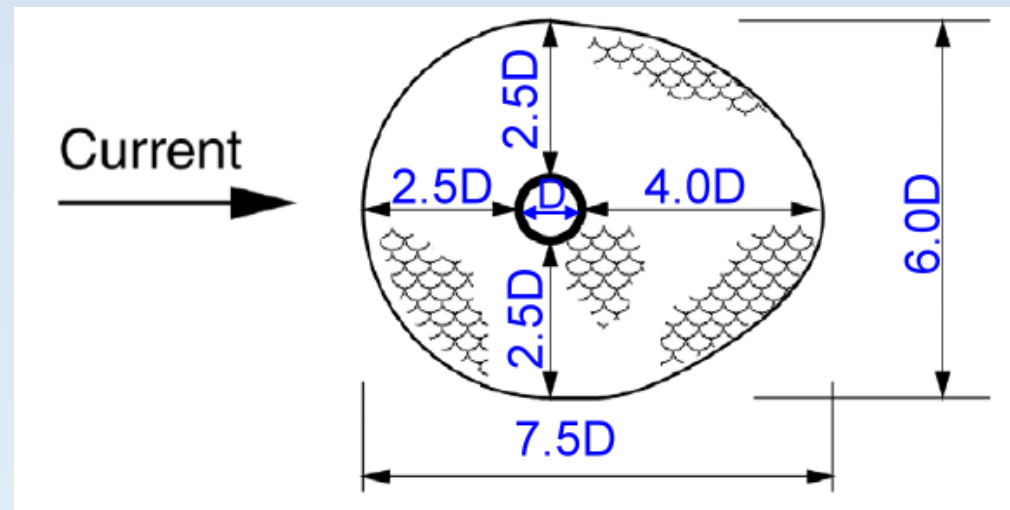


Figure 2-11. Edge failure process, situation a - d correspond with a gradual increase in flow velocity [Unger *et al.*, 2006].



運維須注意之關鍵課題

一、金屬疲勞破壞

二、結構共振破壞

三、基礎淘刷擴大



運維須注意之關鍵課題

一、金屬疲勞破壞

二、結構共振破壞

三、基礎淘刷擴大

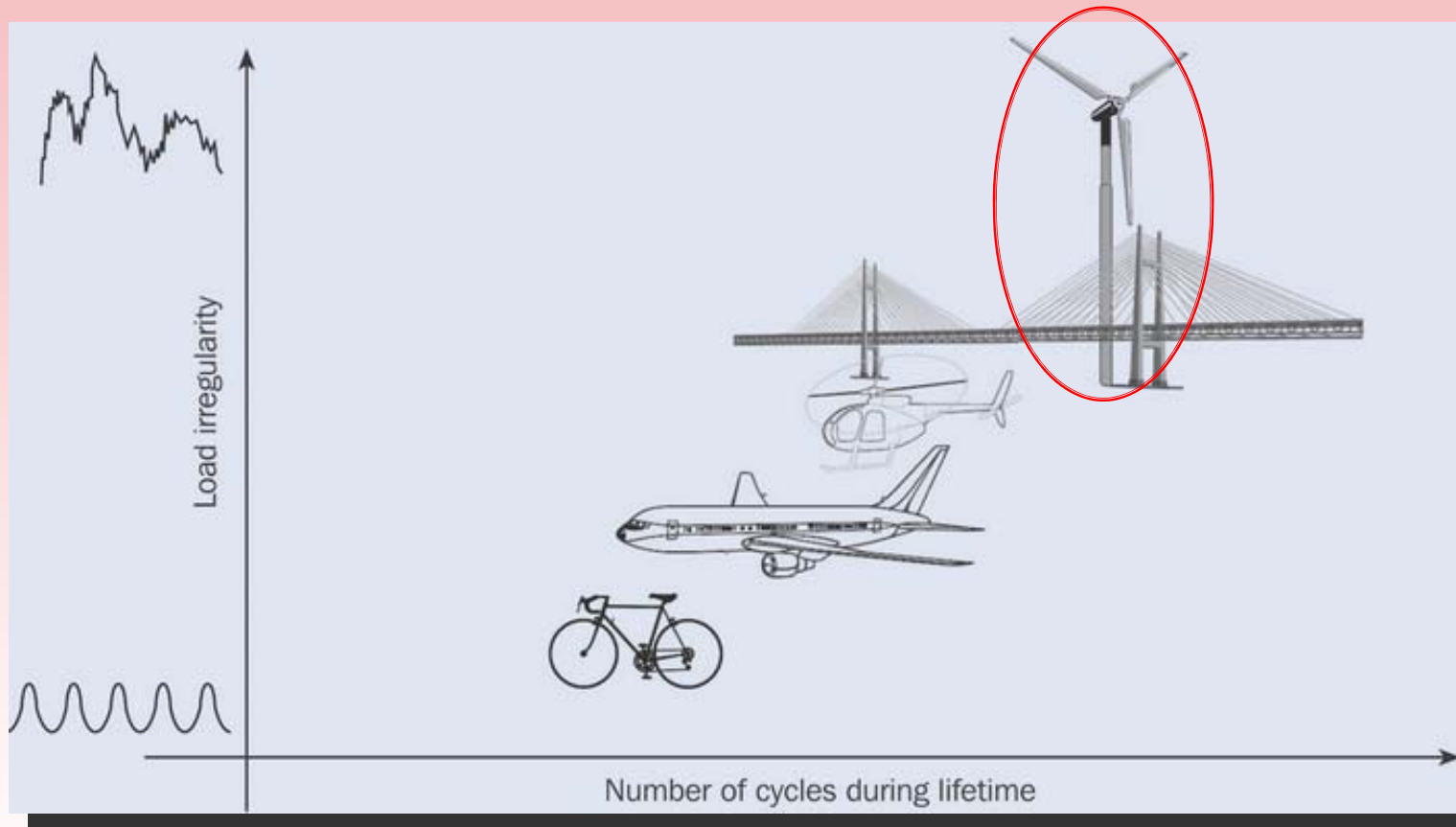


金屬疲勞

運維關鍵課題

▶ 疲勞

- ▶ 金屬材料持續受到反覆作用之動態應力造成材料產生脆化行為

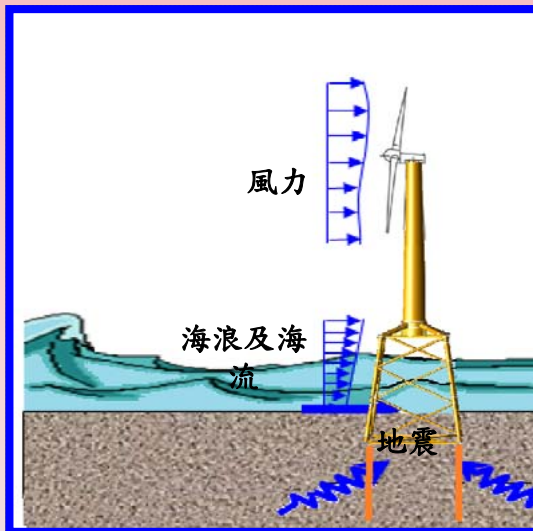


生活常見鋼結構金屬疲勞現象

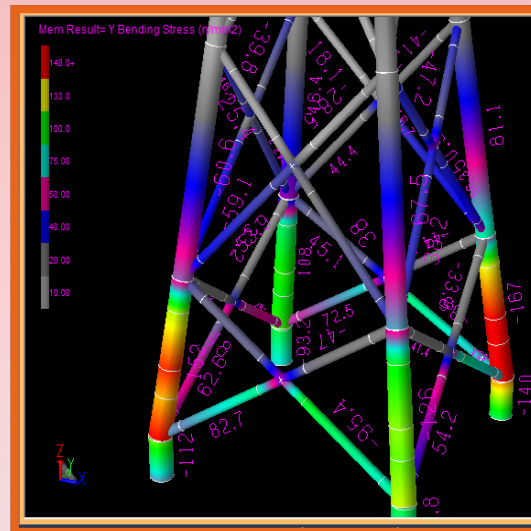
金屬疲勞

運維關鍵課題

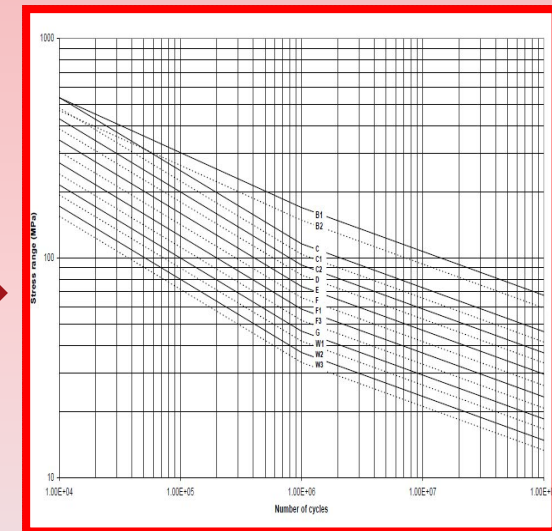
疲勞分析流程



- 受力分析
 - 風力機組載重
 - 環境載重
 - 樁土互制行為



- 應力分析
 - 軸應力 (P/A)
 - 彎矩應力 (My/I)
 - SCFs



- 疲勞分析
 - 疲勞應力範圍
 - S-N 曲線
 - Miner's Law

金屬疲勞

運維關鍵課題

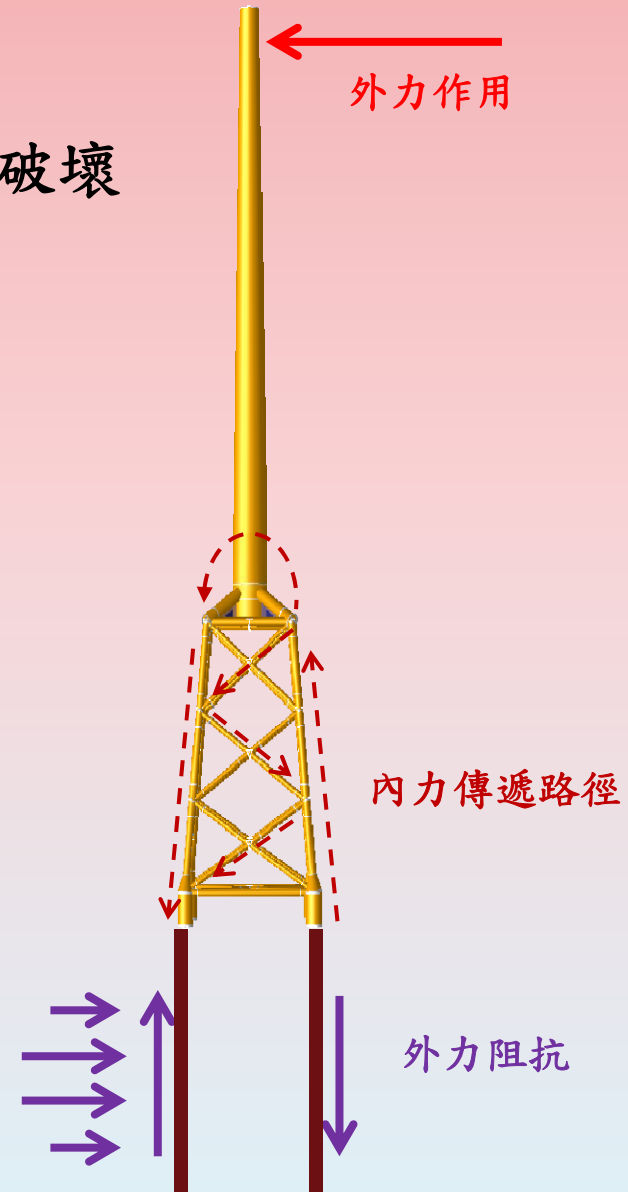
▶ 疲勞破壞關鍵

- ▶ 銲接-良好的銲接品質得以降低疲勞破壞



- ▶ 結構形式-建立適當力量傳遞行為

- ▶ 斜撐角度、斜撐種類(K、T、Y型)



金屬疲勞

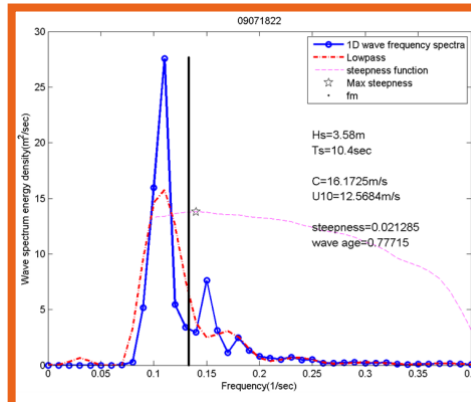
運維關鍵課題

疲勞載重取得

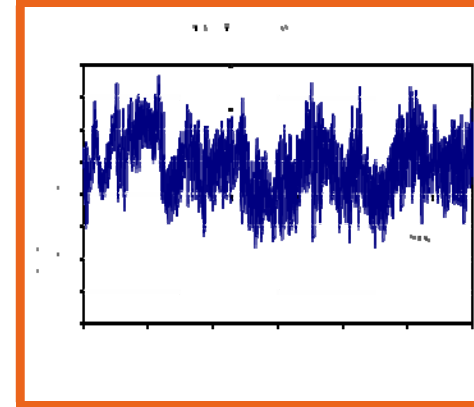
Derived DEL wave parameters

Wave no.	Hs (m)	Tp (sec)	DAF	Cycles	Freq. (Hz)
1	0.78	3.69	9.925	3.09E+07	0.271
2	1.20	5.10	2.091	2.91E+07	0.196
3	1.68	6.10	1.577	3.01E+07	0.164
4	2.21	7.64	1.304	4.23E+07	0.131
5	0.88	11.27	1.120	1.73E+06	0.089

疲勞等值載重



外力頻譜分析



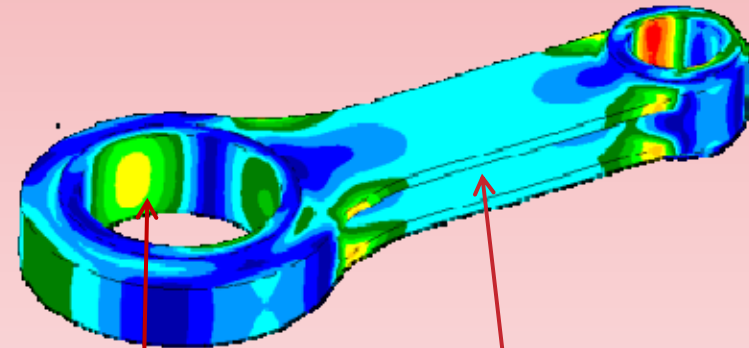
歷時載重分析

保守

經濟

▶ 熱點應力定義

- 標稱應力-因結構斷面尺寸均勻性，使截面積所受呈均勻分布之應力
- 熱點應力-考慮結構不連續或斷面不均處，發生之應力



應力均勻分布處

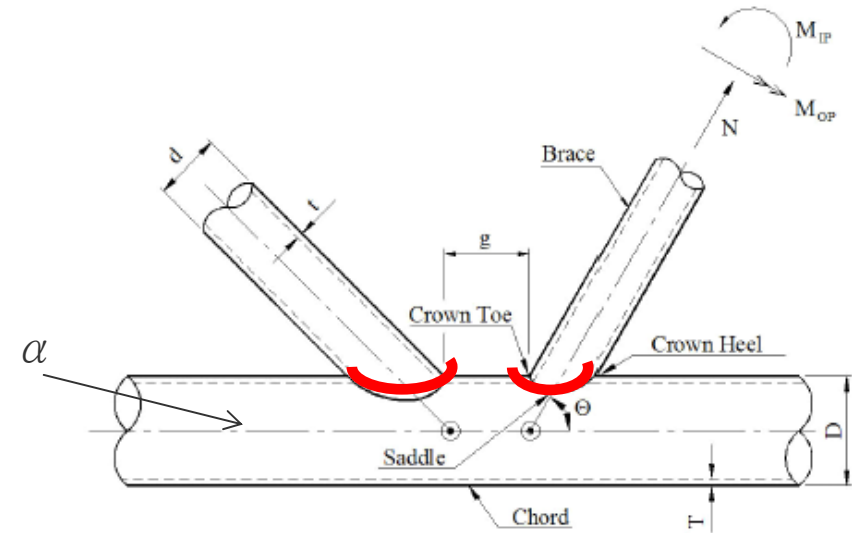
因結構幾何產生之
熱點應力處

金屬疲勞

▶ 熱點應力

- 計算各桿件應力放大因子 (SCF)
- 線性疊加求得熱點應力

$$\Rightarrow \sigma_{hot\ spot} = SCF \times \sigma_{nominal}$$



管狀元素熱點應力公式

$$\sigma_1 = SCF_{AC} \sigma_x + SCF_{MIP} \sigma_{my}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(SCF_{AC} + SCF_{AS}) \sigma_x + \frac{1}{2}\sqrt{2} SCF_{MIP} \sigma_{my} - \frac{1}{2}\sqrt{2} SCF_{MOP} \sigma_{mz}$$

$$\sigma_3 = SCF_{AS} \sigma_x - SCF_{MOP} \sigma_{mz}$$

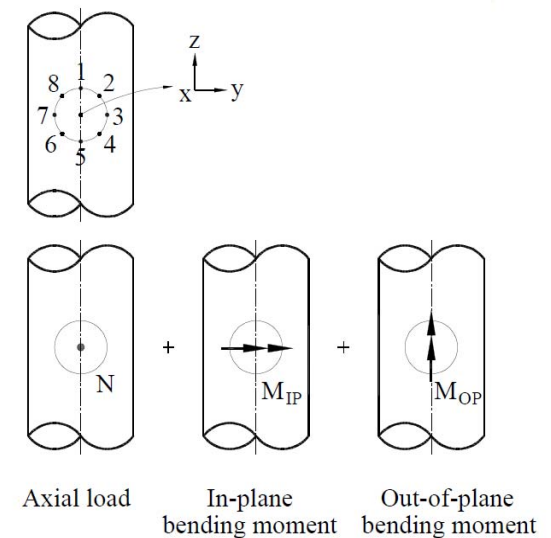
$$\sigma_4 = \frac{1}{2}(SCF_{AC} + SCF_{AS}) \sigma_x - \frac{1}{2}\sqrt{2} SCF_{MIP} \sigma_{my} - \frac{1}{2}\sqrt{2} SCF_{MOP} \sigma_{mz}$$

$$\sigma_5 = SCF_{AC} \sigma_x - SCF_{MIP} \sigma_{my}$$

$$\sigma_6 = \frac{1}{2}(SCF_{AC} + SCF_{AS}) \sigma_x - \frac{1}{2}\sqrt{2} SCF_{MIP} \sigma_{my} + \frac{1}{2}\sqrt{2} SCF_{MOP} \sigma_{mz}$$

$$\sigma_7 = SCF_{AS} \sigma_x + SCF_{MOP} \sigma_{mz}$$

$$\sigma_8 = \frac{1}{2}(SCF_{AC} + SCF_{AS}) \sigma_x + \frac{1}{2}\sqrt{2} SCF_{MIP} \sigma_{my} + \frac{1}{2}\sqrt{2} SCF_{MOP} \sigma_{mz}$$



金屬疲勞

S-N曲線

- S-N曲線係以反覆應力範圍(S)為縱軸，反覆作用次數(N)為橫軸組成，該曲線為實驗數據統計而成
- 依據不同接合方式、環境條件，選取適當曲線
- 取得循環作用次數，進行後續累積疲勞傷害

已知熱點應力

S-N curve	$N \leq 10^7$ cycles		$N > 10^7$ cycles	Fatigue limit at 10^7 cycles *)	Thickness exponent k	Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), ref. also equation (2.3.2)
	m_1	$\log \bar{a}_1$	$\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$			
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.05	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.10	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	12.164	15.606	52.63	0.25 for SCF \leq 10.0 0.30 for SCF $>$ 10.0	1.00

*) see also [2.11]

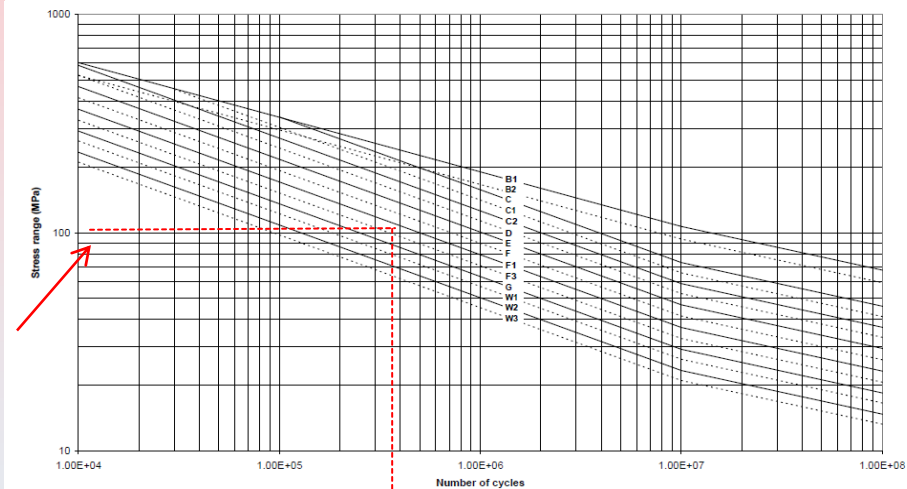


Figure 2-8 S-N curves in air

判讀該熱點應力
循環作用次數

金屬疲勞

▶ 疲勞累積

◦ Palmgren-Miner-Rule 疲勞疊加

$$\rightarrow D_C = \sum_{i=1}^I \frac{n_{c,i}}{N_{c,i}}$$

$$\rightarrow D_d = DFF \times D_C$$

$$\rightarrow D_d < 1 \quad \text{OK!}$$

•DFF (Design Fatigue factor)

Location	Accessibility for inspection and repair of initial fatigue and coating damages ²⁾	S-N curve ⁵⁾	DFF ⁶⁾
Atmospheric zone	No	'In air' for coated surfaces	3
	Yes	'Free corrosion' for surfaces protected by corrosion allowance, only ⁴⁾	2 or 1
Splash zone ¹⁾	No	Combination of 'in air' and 'free corrosion' curves ^{3) 4)}	3
	Yes		2 or 1
Submerged zone	No	'In seawater' for surfaces with cathodic protection	3
	Yes	'Free corrosion' for surfaces protected by corrosion allowance, only ⁴⁾	2 or 1
Scour zone	No	'Free corrosion' for surfaces protected by corrosion allowance, only ⁴⁾	3
Below scour zone	No	'In seawater'	3

依據不同結構區域、維修性決定DFF

運維須注意之關鍵課題

一、金屬疲勞破壞

二、結構共振破壞

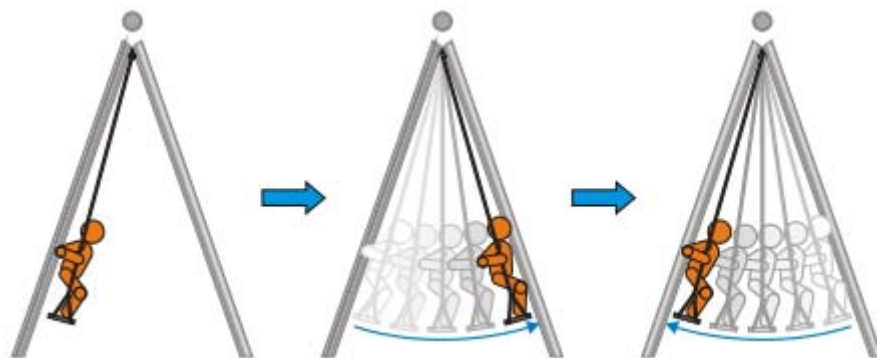
三、基礎淘刷擴大



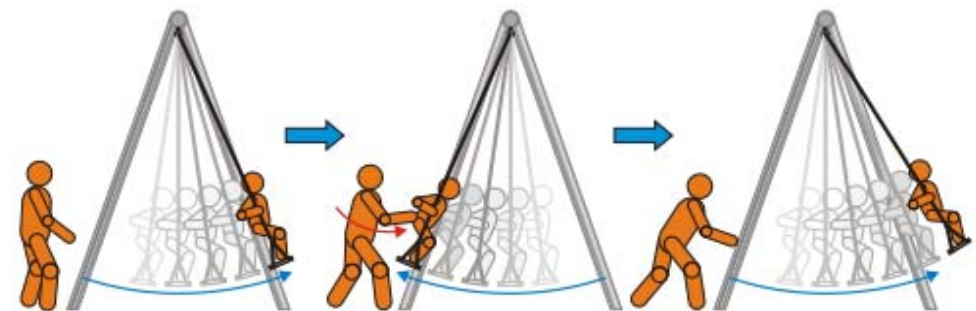
結構共振破壞

▶ 共振現象

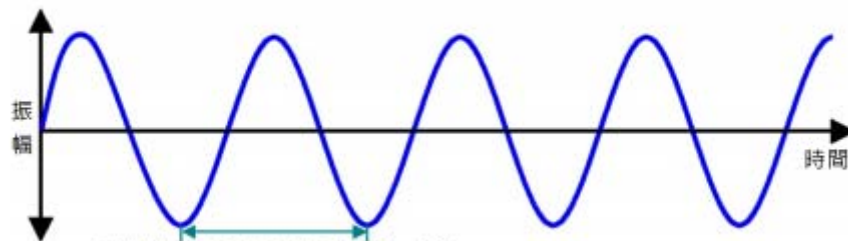
- 每個結構物都有自己的自然振動週期或頻率
- 若將盪鞦韆類比成結構物，當外力施加頻率接近自然振動頻率時就會發生**共振**。



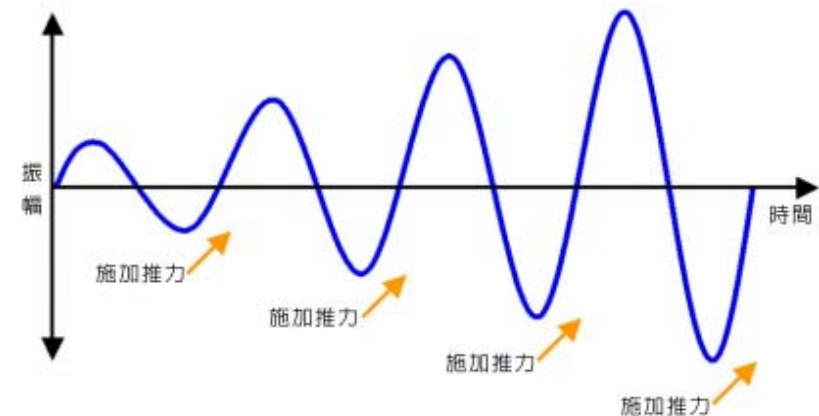
鞦韆來回一次的自然振動週期 (3秒)



每隔3秒施加一次推力，推力與鞦韆會形成共振



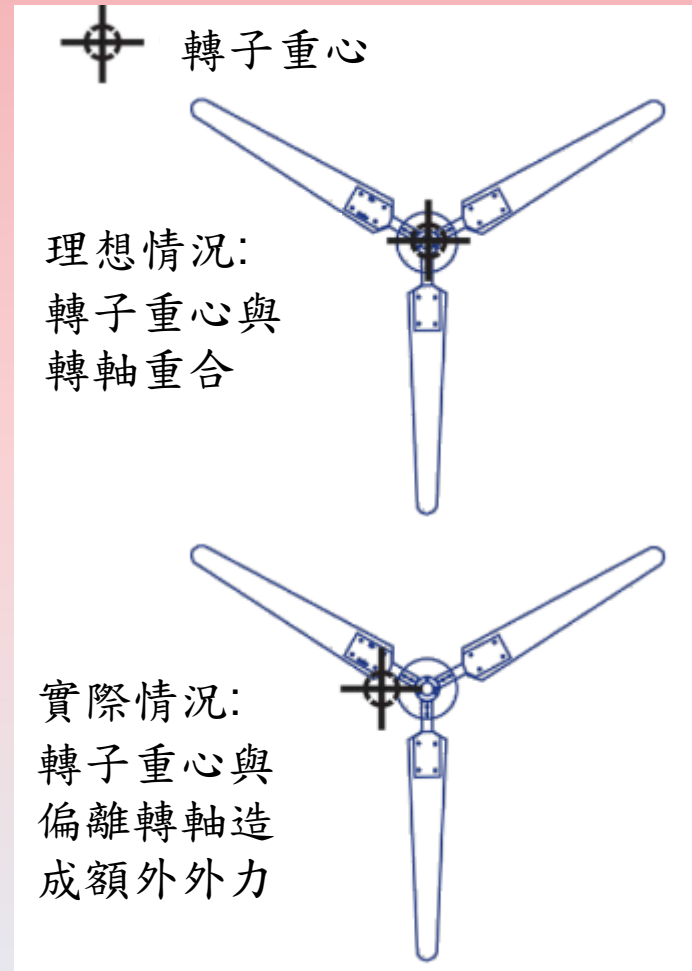
鞦韆來回一次的自然振動週期 (3秒)



結構共振破壞

▶ 1P頻率

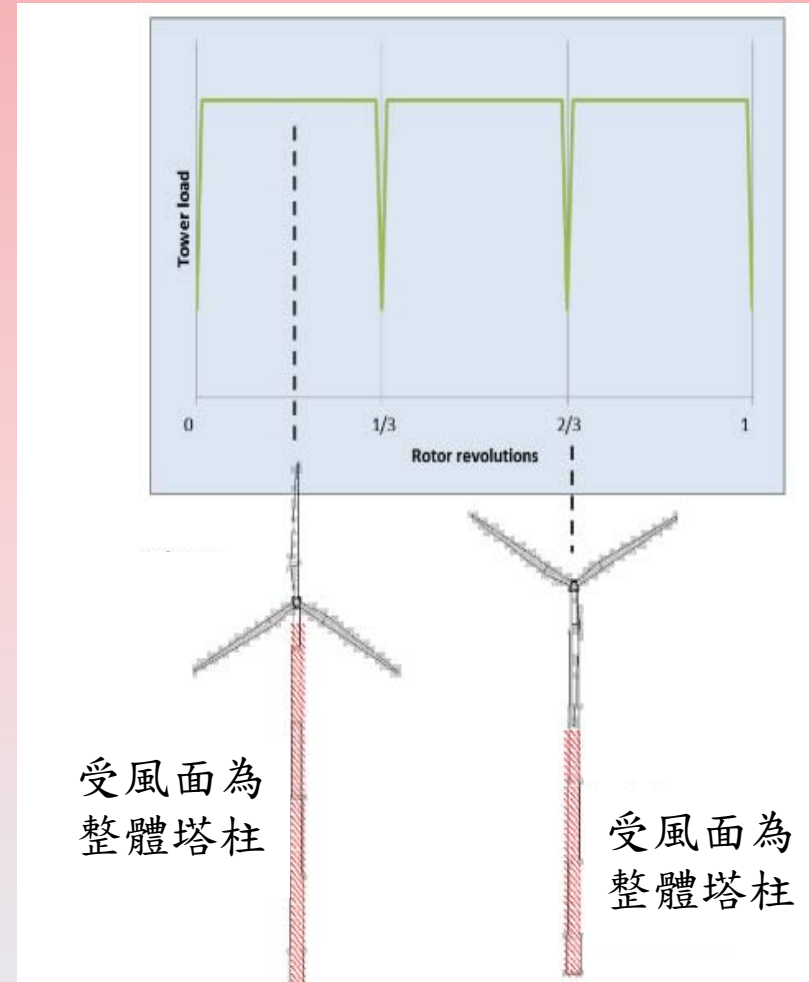
- 由於轉子製造上不可避免地**偏心**，造成額外周期性的負載
- 每轉一圈發生一次。



結構共振破壞

▶ 3P頻率

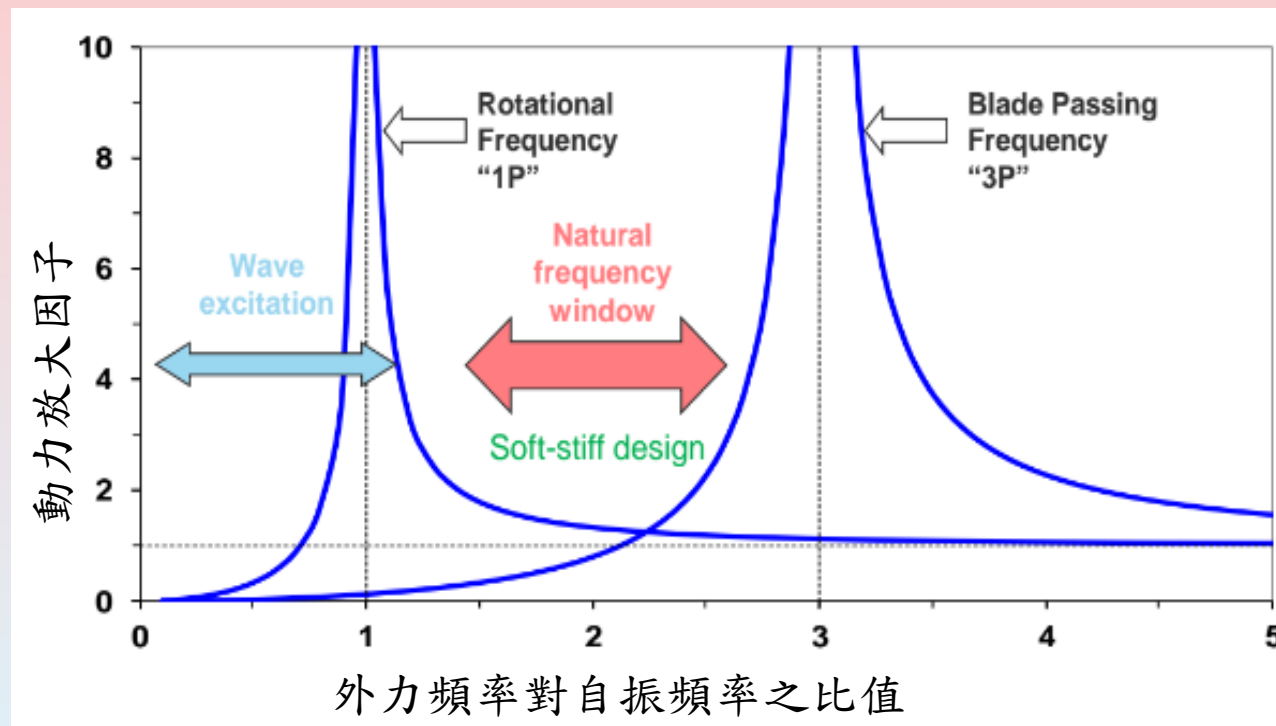
- 轉動過程中，扇葉遮蔽塔柱引起週期性的降載效應
- 每轉一圈發生三次(三片扇葉各遮蔽一次)。



結構共振破壞

▶ 結構共振

- 將結構外力頻率除以自振頻率，當頻率比接近1及3時(1P及3P)，外力引發之振幅極高，造成結構損毀。
- 設計時須檢討結構勁度及質量避免發生**共振**。
- 營運中結構勁度及質量因海生附著物等環境因素影響，可能與設計出現差異，故需藉由營運中監測資料進行分析檢討

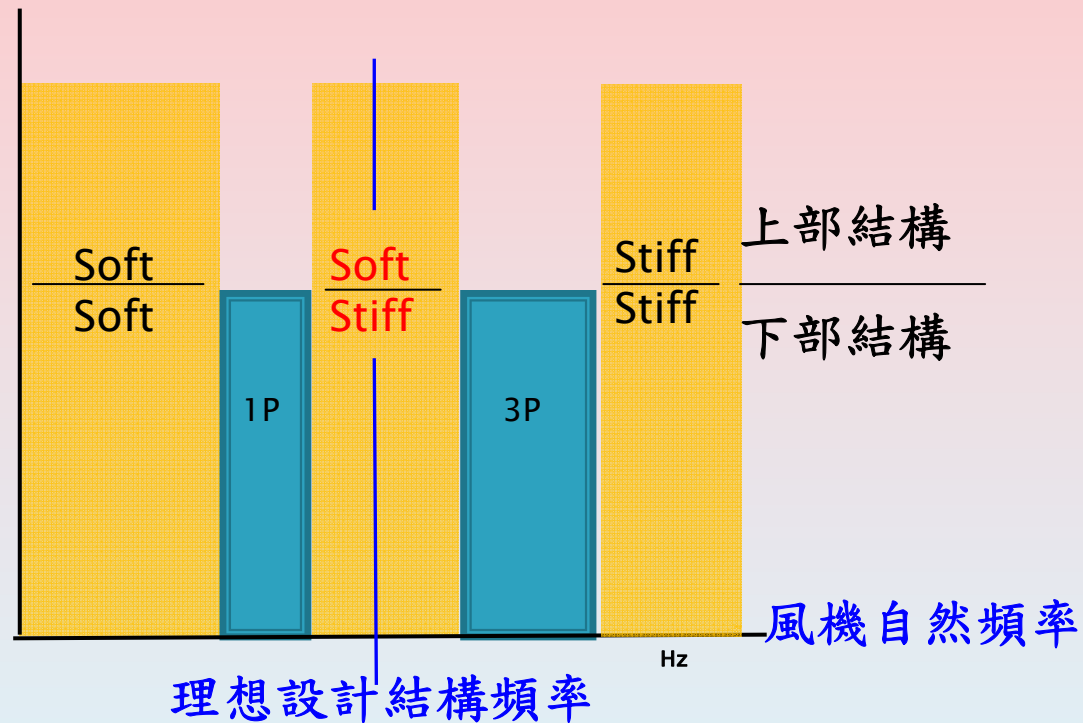


結構共振破壞



▶ 結構設計

- 結構頻率因1P及3P風機自然頻率，可將結構區分為Soft-Soft、Soft-Stiff、Stiff-Stiff三種型態
- 理想結構設計應將頻率調整坐落Soft-Stiff區域。



結構共振破壞

▶ 影響結構頻率因素

$$[M] \begin{bmatrix} \ddot{X} \end{bmatrix} + [C] \begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} + [K] [X] = [F(t)]$$

M：質量

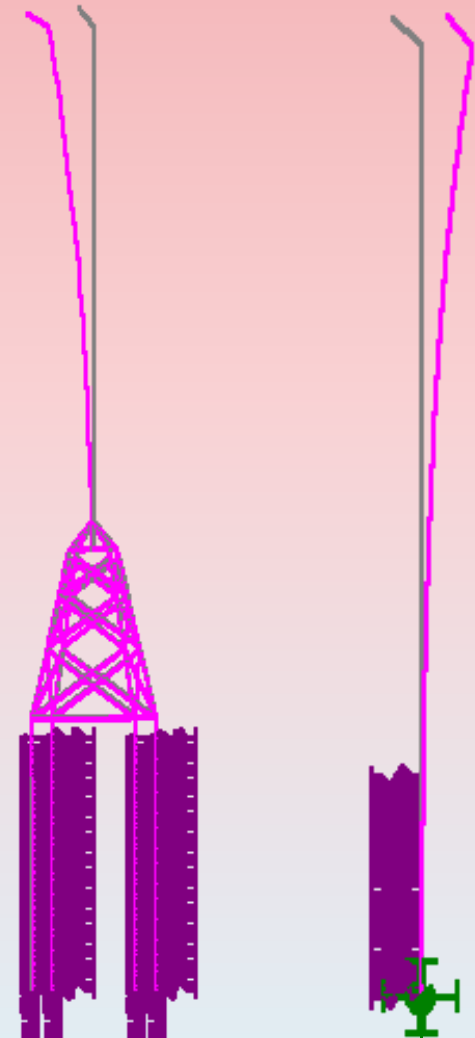
C：阻尼係數

K：勁度

X：位移量

·：對時間之微分

F：外力(與時間有關)



結構共振破壞

▶ 影響結構頻率因素

○ 一般因素

- 轉子高程
- 塔架直徑/厚度
- 風機機型
- 風力機組控制系統
- 土壤條件
- 海生附著物
- 次要結構重
- 淘刷
-

○ 不同結構形式考量

- 套筒式基礎→基礎寬度(footprint)、套筒斷面、樁連接長度、連接段型式...
- 單樁式基礎→樁基礎直徑、樁基礎版厚

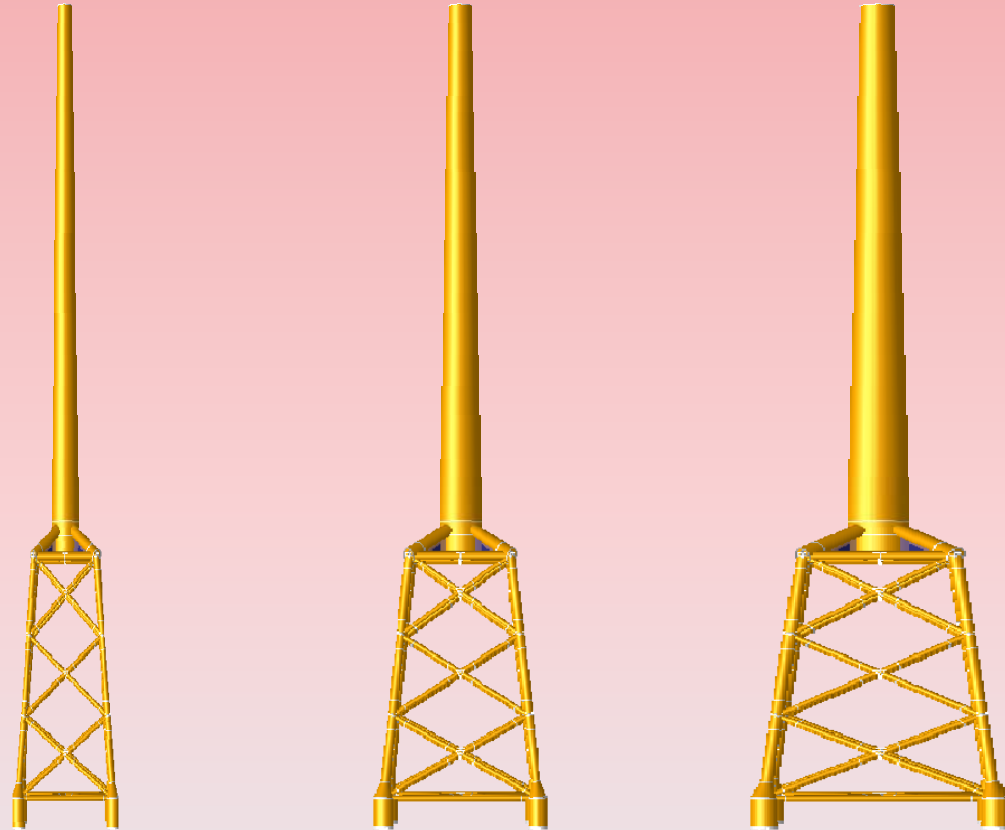


結構共振破壞

運維關鍵課題

▶ 基礎寬度(footprint)

- 樁受力行為
- 自然頻率
- 連接段型式



- 基礎寬度 ↑
- 自然頻率 ↓
- 樁受力 ↑

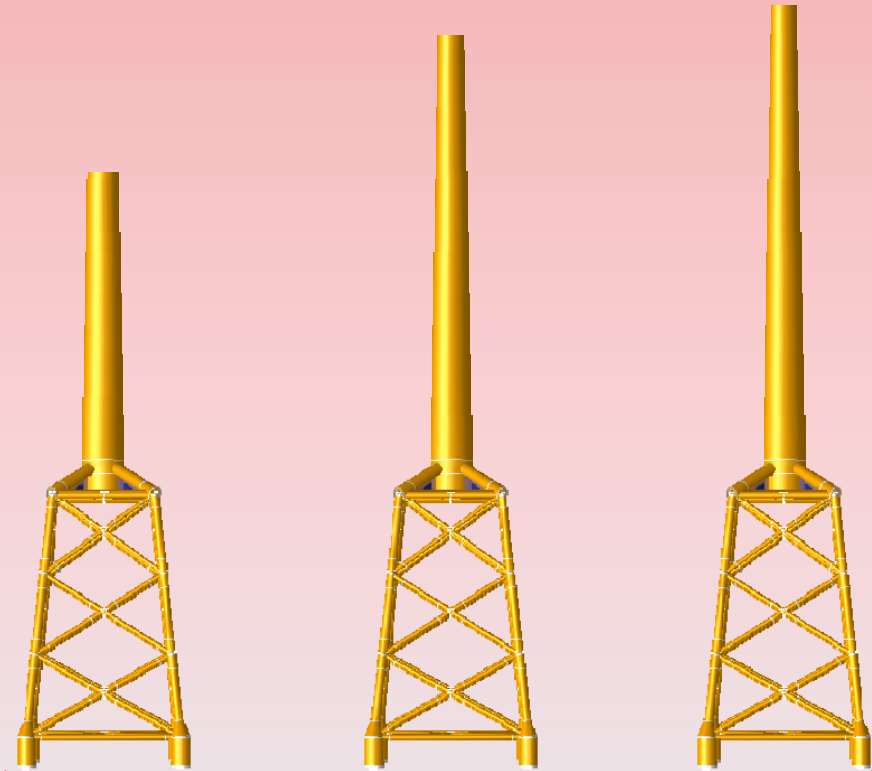
- 基礎寬度 ↑
- 自然頻率 ↑
- 樁受力 ↓

結構共振破壞

▶ 輪轂高度

- 須配合風機廠商需求
- 自然頻率、結構受力行爲
- 參考英國規範 Marine Guidance Note (MGN)
葉片低處尖端至少需位於平均水位面22公尺 ↑

"Offshore wind turbines located around the UK are required to have the lowest point of the rotor sweep at least 22 metres above Mean High Water Springs. This clearance should be ample for the majority of small craft. Those with a greater air draught should be aware of this height, and take appropriate care. It would, in any case, be imprudent for larger vessels to be this close to a turbine, other than in an emergency."



轉子高度 ↓

- 自然頻率 ↑

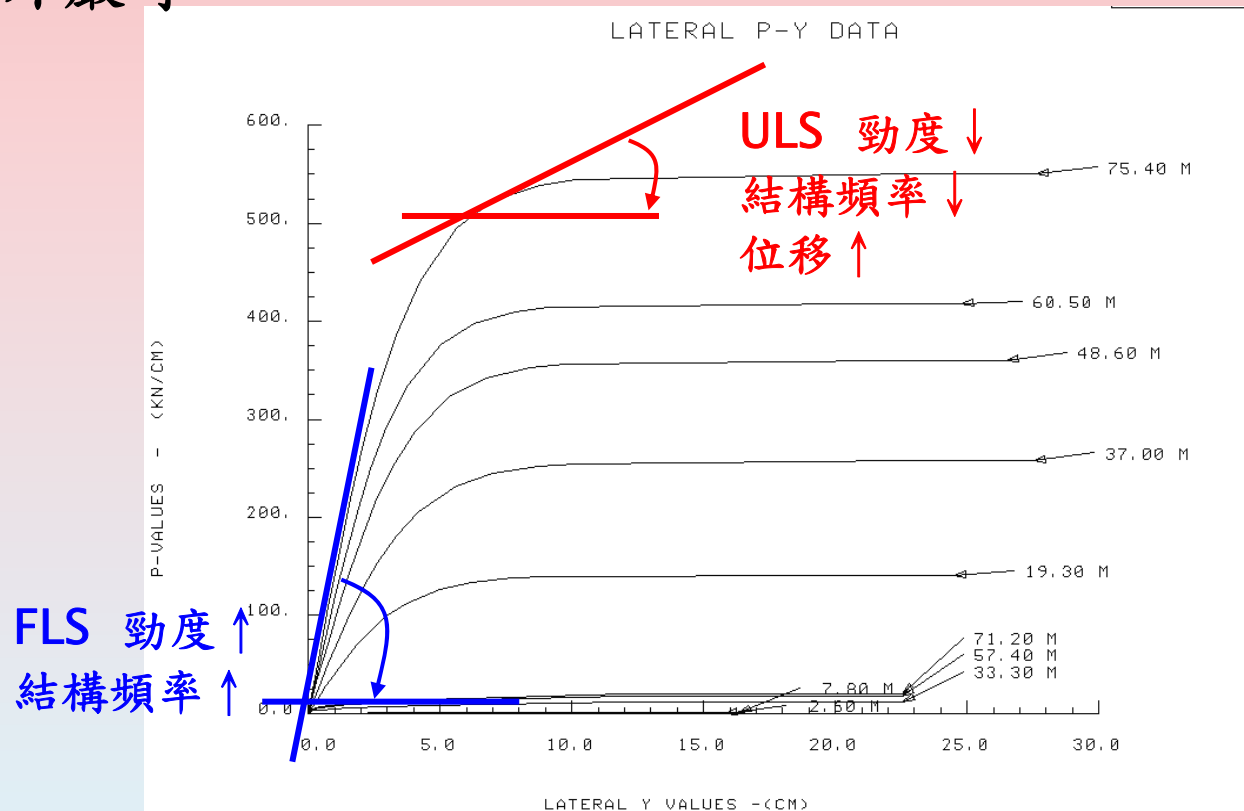
◦ 轉子高度 ↑

- 自然頻率 ↓

結構共振破壞

▶ 土壤勁度曲線

- 結構承受ULS時，彈簧勁度下降，故需注意樁頭位移量是否在允許限度內。
- 台灣西部海岸**土壤性質軟弱**，其側向變位(SLS限制)及彎矩均較國外嚴苛



結構共振破壞

▶ 海生物附著

- 台灣位處亞熱帶區域，其海生物附著的程度均較歐洲風場嚴峻
- 海生物附著將導致結構整體重量增加，進而**改變結構頻率**。
- 結構設計時應評估海生物附著對結構之影響
- 考慮適當**海生物刮除系統**，及定期派員觀測，以控制海生物附著



參考資料：

<http://www.offshorewind.biz/2011/11/10/foundocean-expands-its-subsea-and-offshore-services-with-introduction-of-marine-growth-prevention-and-control-products-uk/>
<https://en.wikipedia.org/wiki/Biofouling>

運維須注意之關鍵課題

運維關鍵課題

一、金屬疲勞破壞

二、結構共振破壞

三、基礎淘刷擴大

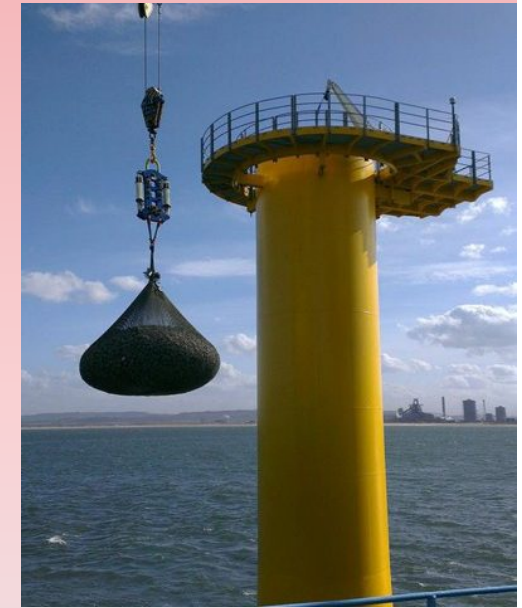


基礎淘刷擴大

運維關鍵課題

保護工型式

■ 拋石(Rock dumping)

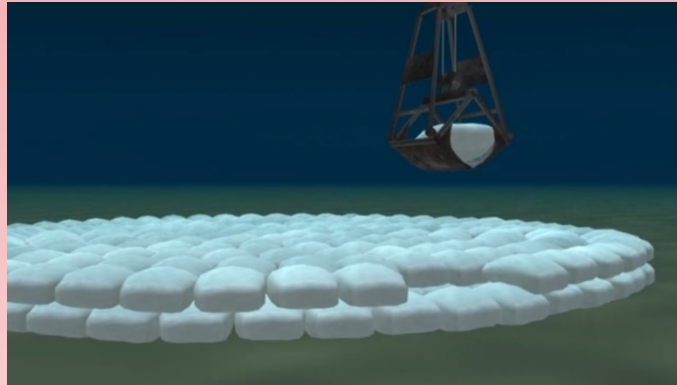


基礎淘刷擴大

運維關鍵課題

保護工型式

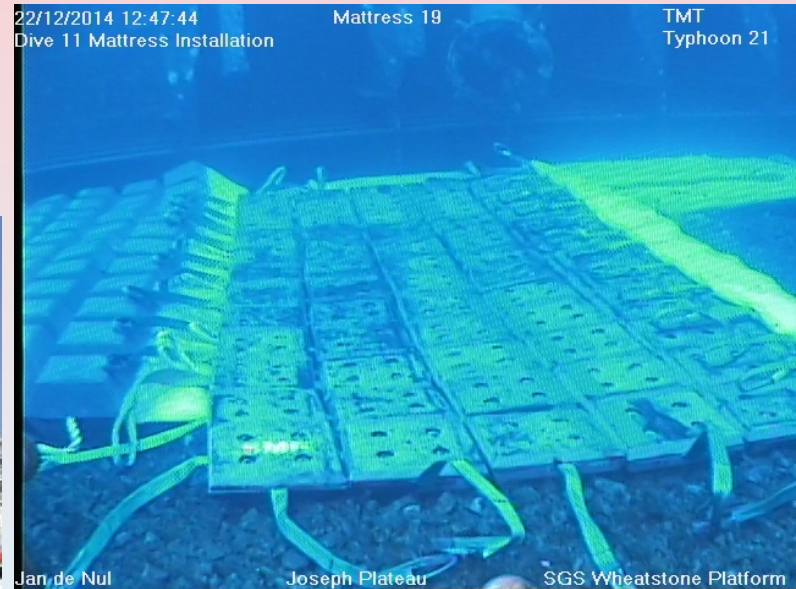
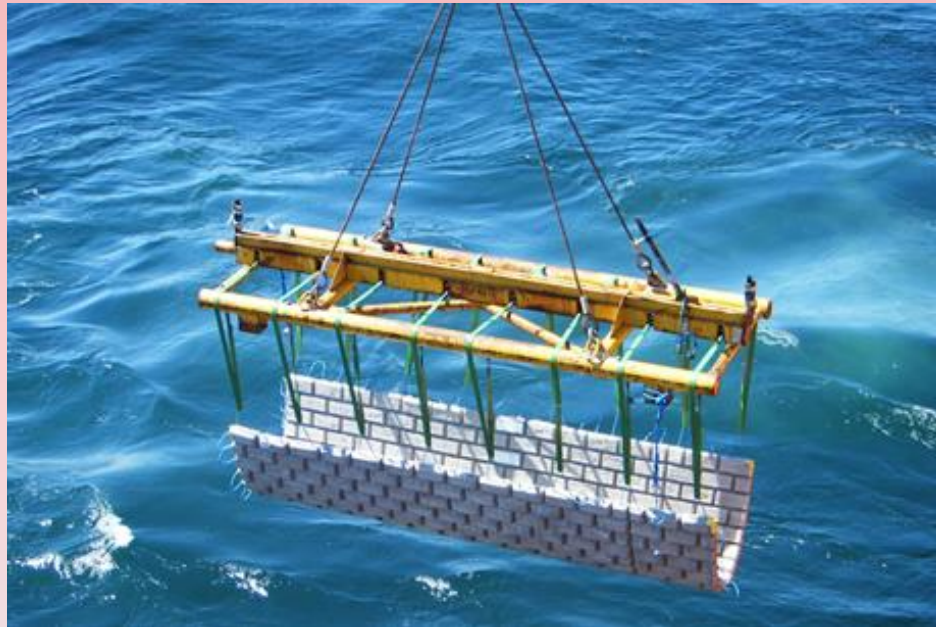
■ Geotextile



基礎淘刷擴大

保護工型式

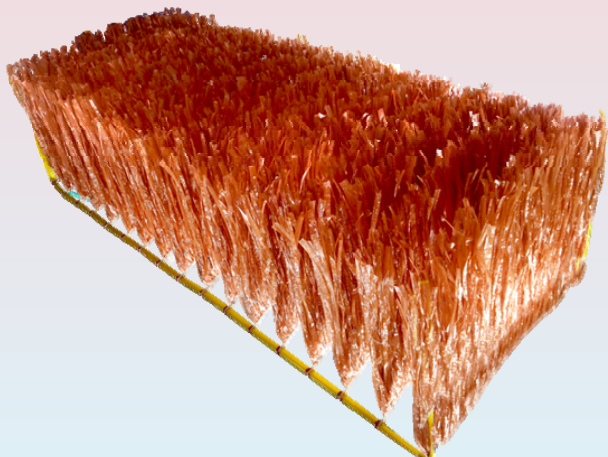
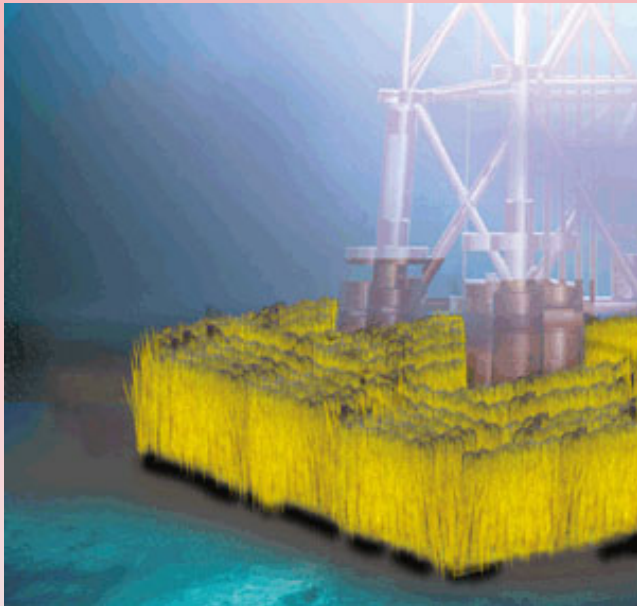
- 混凝土蓆塊(Concrete mattresses)



基礎淘刷擴大

保護工型式

■ Frond mattresses



基礎淘刷擴大

運維關鍵課題

保護工型式

- Scour prevention mats



基礎淘刷擴大

拋石保護工計算

- 港灣構造物設計基準 — Hudson公式

$$M = \frac{\rho_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3}$$

M : 拋石安定質量

ρ_r : 拋石材料密度

H : 設計波高

N_s : 依覆面材之形狀、坡度及損害率等決定之安定數

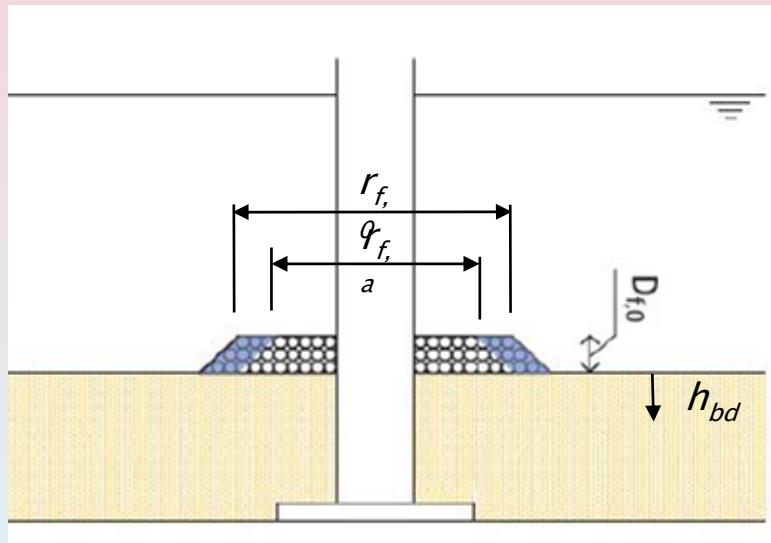
S_r : 拋石材料比重

基礎淘刷擴大

運維關鍵課題

拋石保護工計算

- Bonasoundas
- Breusers
- Richardson
- Hoffmans



1. Determination of the required $d_{f,50}$ to prevent shear failure.

Bonasoundas $d_{f,50}(\text{cm}) = 6 - 3,3U_0 + 4U_0^2$

Breusers $d_{f,50}(\text{m}) = 1,348 \frac{U_0^2}{\Delta_f 2g}$

Richardson $d_{f,50}(\text{m}) = 0,692 \frac{(KU_0)^2}{\Delta_f 2g}$

Hoffmans $d_{f,50}(\text{m}) = 0,7 \frac{(r_0 U_0)^2}{\Psi_0 g \Delta_f}$

In which:

U_0 = the undisturbed mean flow velocity [ms⁻¹]

K = correction factor for the pile shape [-]

r_0 = the depth-averaged turbulent intensity [-]

2. Determination of the required $D_{f,0}$ to prevent winnowing.

$$\frac{D_f}{0,8 \cdot d_{f,50}} = \alpha_d \ln \left(\frac{d_{f,50} \Delta_f}{d_{b,50} \Delta_b} \right)$$

In which:

$d_{b,50}$ = sieve size that can be passed by 50 % of the sand particles

$d_{f,50}$ = sieve size that can be passed by 50 % of the filter stones =

Δ_b = relative density of the base material = 1,65

Δ_f = relative density of the filter material = 1,8

α_d = coefficient that expresses the damping of turbulence = 1,5

3. Determination of the required extent to prevent bed degradation induced failure.

$$r_{f,0} - r_{f,A} = 1,4 \cdot h_{bd}$$

簡報大綱

一、概述

二、影響下部基礎安全之要素

三、運維須注意之關鍵課題

四、因應構想



營運維護項目

因應構想

▶ 定義



監測系統

建置現場監測儀器，長期收集資訊並回傳至陸上資料處理



檢測計畫

定期(例如一年)至現場進行檢查、修復等查驗工作。



警戒系統

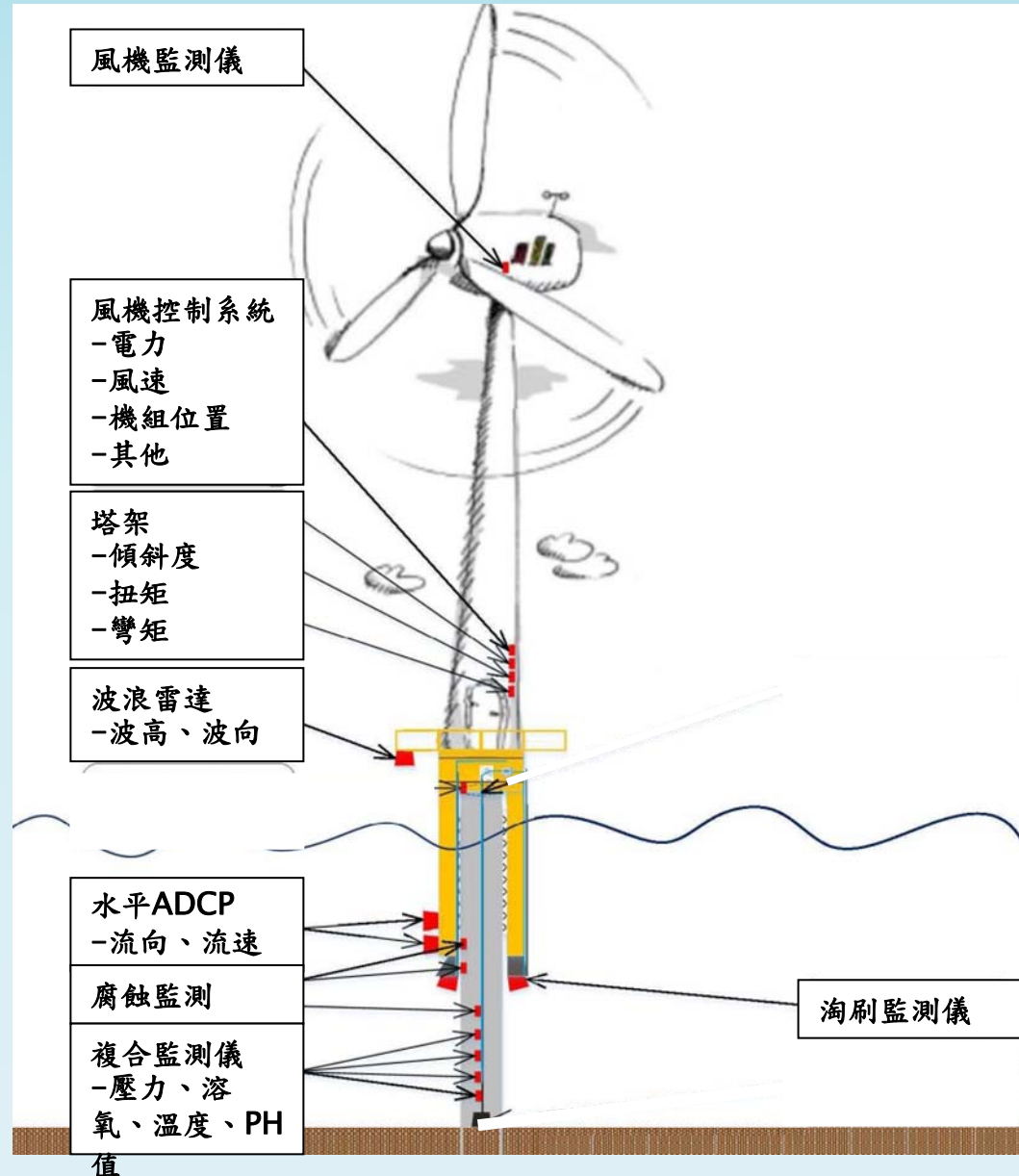
設置警示系統防止船舶、航機等勿入風場，對支撐結構造成破壞。

監測系統

因應構想

▶ 監測系統

- 風機運轉監控
- 海洋環境監測
- 下部基礎變位監測
- 淘刷監測



監測系統

因應構想

▶ 腐蝕監測儀器



陽極塊監測



複合監測儀
-壓力/溶氧量/溫度/PH值



腐蝕監測儀

<http://www.wfs-tech.com/>

<http://nalco.ecolab.com/>

<http://www.sea-sun-tech.com/technology.html>

監測系統

因應構想

▶ 海洋環境監測

波

- 波高

- 波向

流

- 流速

- 流向



Wave Radar



HADCP

監測內容

因應構想

▶ 結構監測儀器

目標	參數	使用儀器
結構頻率	速度或加速度訊號	加速度計或速度計。
結構偏移量	應變、傾度	傾斜儀及應變計。



加速度計



傾斜儀

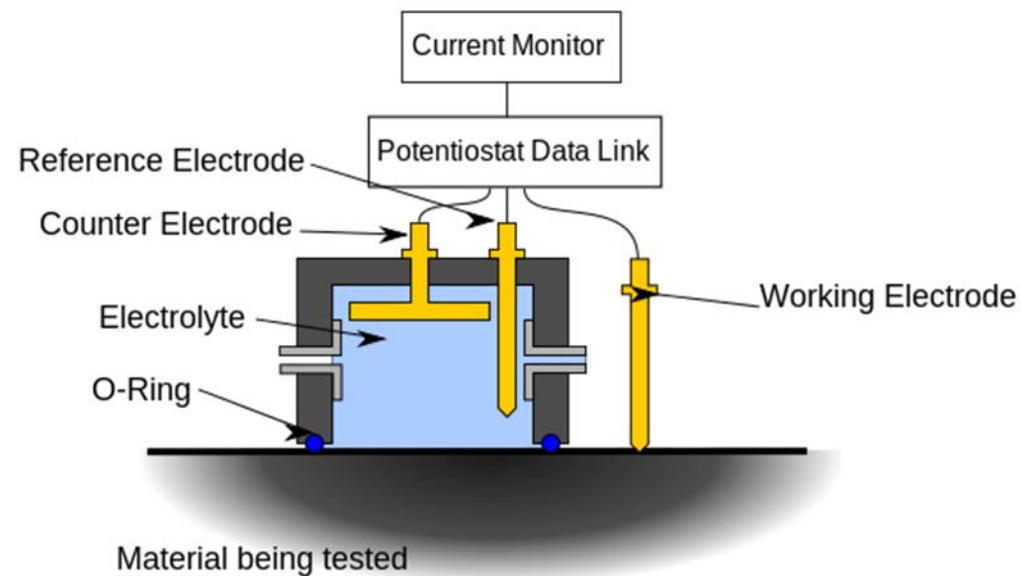


應變計

▶ 金屬疲勞監測儀器

藉由安裝於重要鋼結構銲接處之疲勞感測計記錄結構體在其設計壽年已消耗之時間，讓工程師可以推測所餘壽年。

Electrochemical Fatigue Crack Sensor

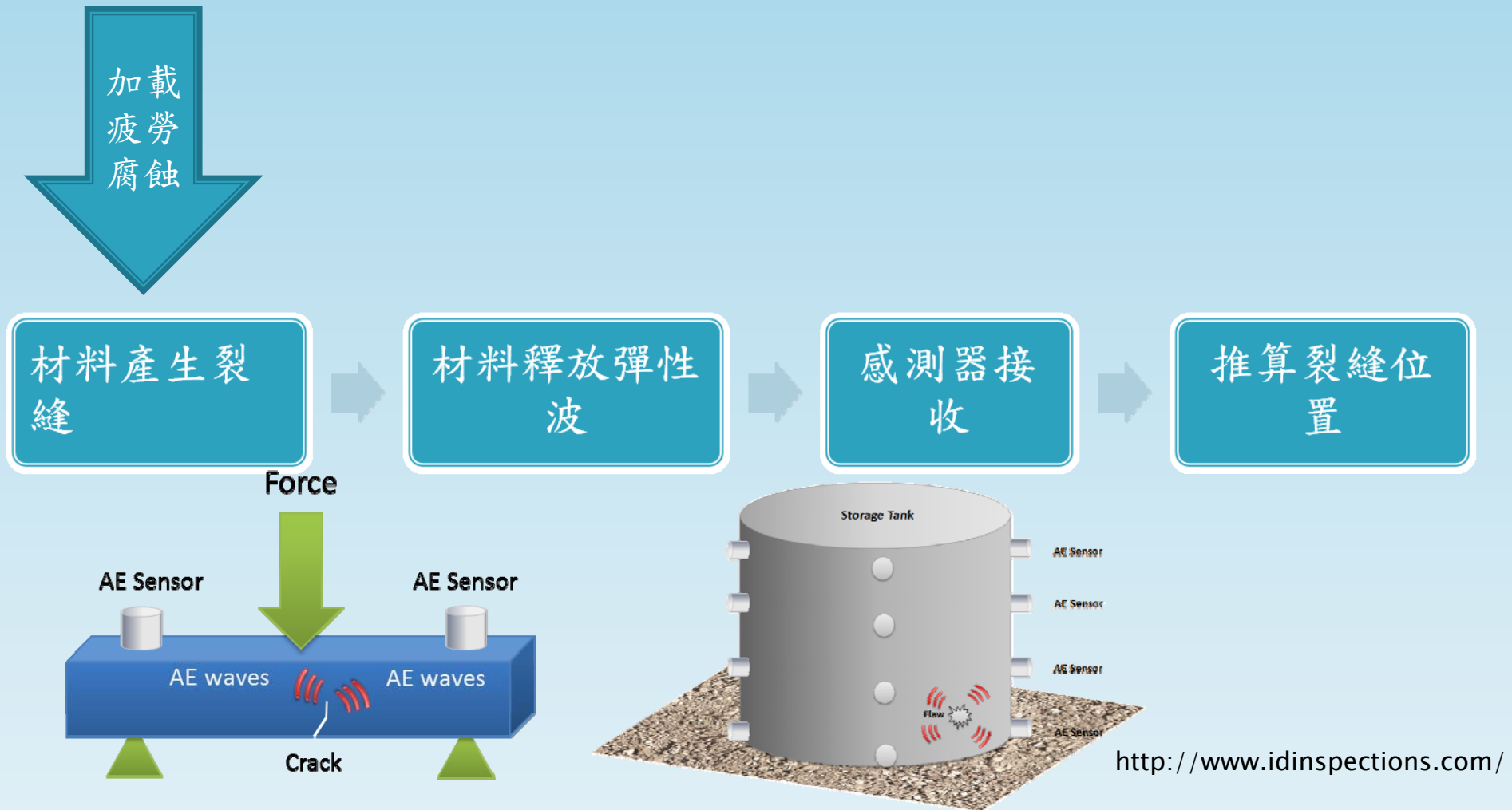


By Evan Mason – Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=37927137>

監測內容

因應構想

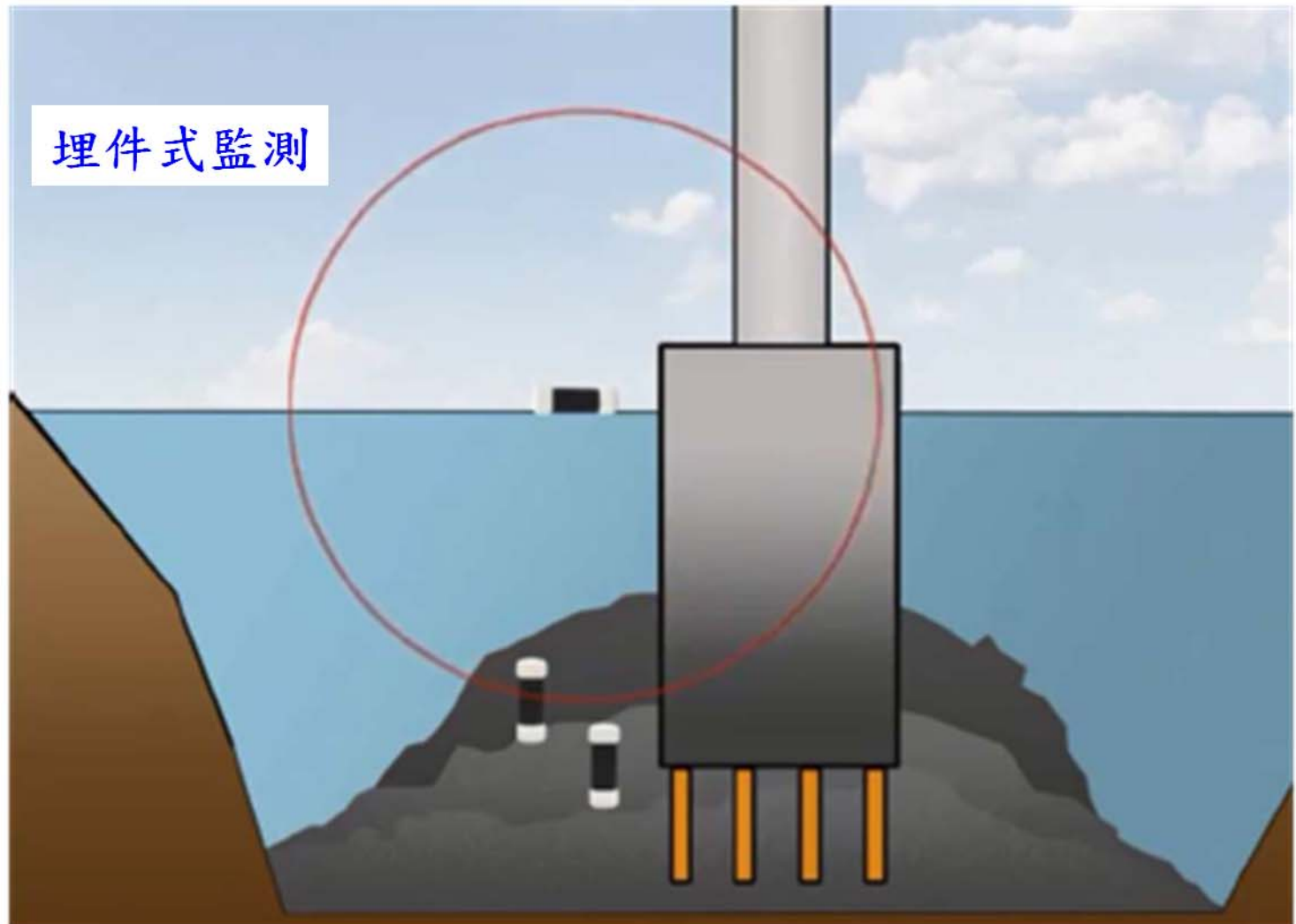
▶ 聲射技術(acoustic emission) :





▶ 淘刷監測

埋件式監測

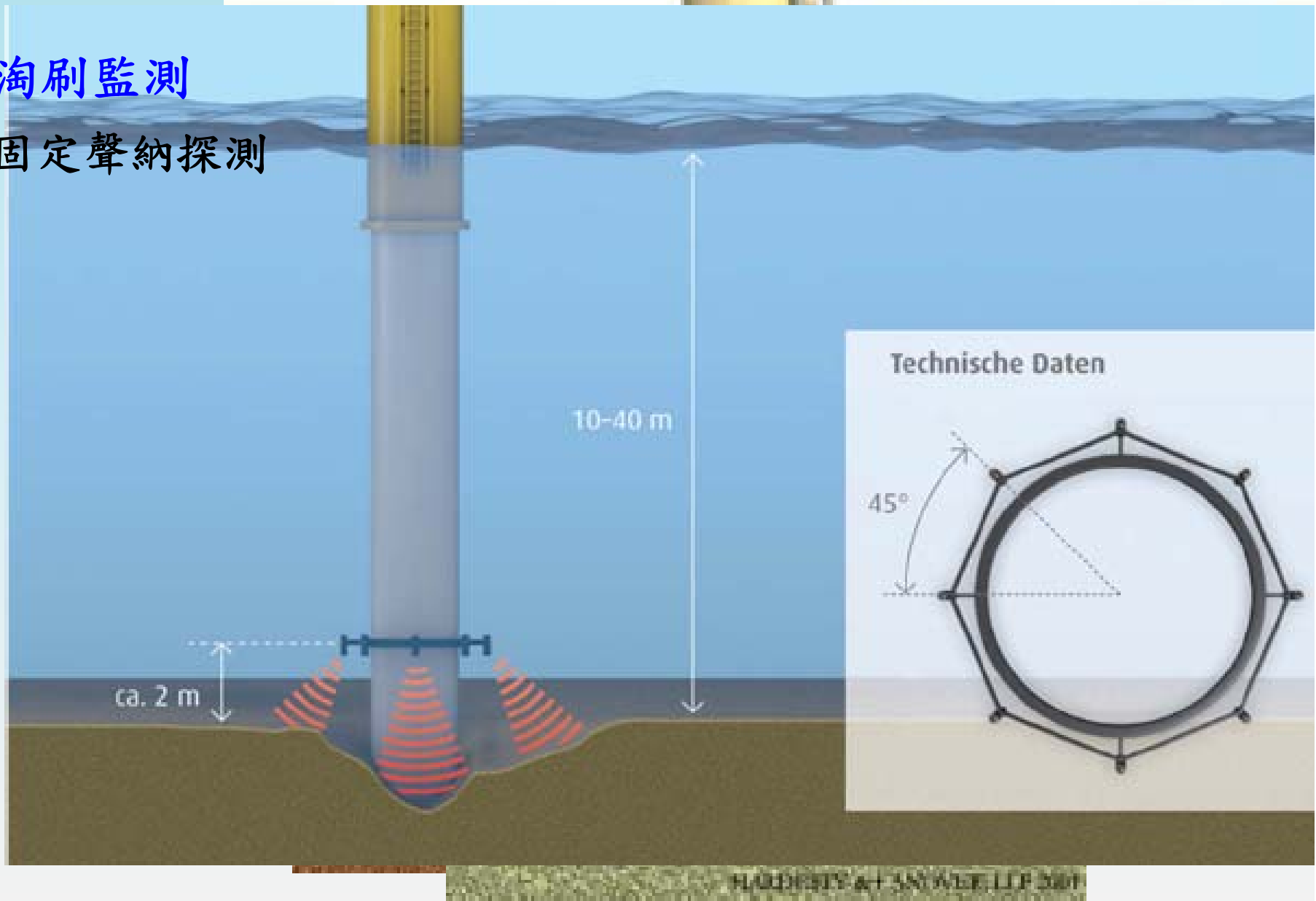


監測內容

因應構想

▶ 淘刷監測

固定聲納探測



定期檢測

因應構想

▶ 建立定期檢測計畫

- 海平面上
 - 支承結構、機組、防蝕塗裝
- 海平面下
 - 腐蝕情形(陽極塊)、海生物附著、淘刷



ROV (Remotely Operated Vehicle)



定期性塗裝檢測



ROV檢測陽極塊使用狀況

<http://paint-inspection.co.uk>
<http://tamboritha.com.au/>

結構監測系統

因應構想

結構監測系統

監測需求

監測項目

週期檢測

反饋

顧問
團隊

業主

開發商

製造商

淘刷

腐蝕

海洋營力

海平面上

海平面下

降低轉速

停機

固定聲納

腐蝕監測

環境監測

波浪

洋流

防蝕保護

淘刷

腐蝕

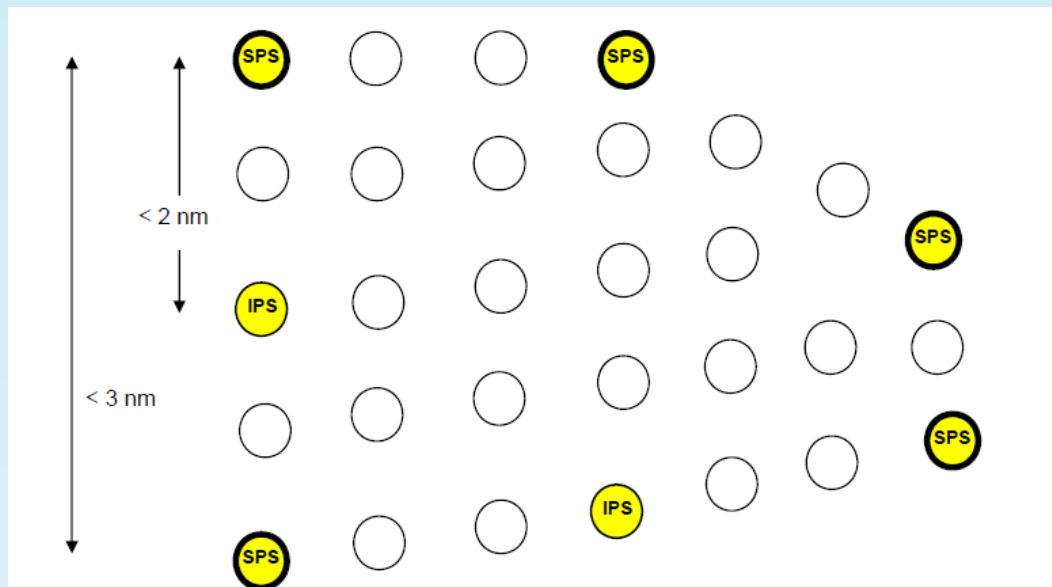
結構

警戒系統

因應構想

▶ 風場警戒

- 依據IALA「The Marking of Man-Made Offshore Structures (IALA Recommendation O-139,20136)」
- SPS: 應配置 LED黃光閃燈，公稱光程**5海浬** ↑
- IPS: 應配置 LED黃光閃燈，公稱光程**2海浬** ↑



Significant Peripheral Structure



Intermediate Peripheral Structure

風場佈置示意圖

▶ 航空障礙燈

- 依交通部民用航空局「航空障礙物標誌與障礙燈設置標準」
- 離岸風力發電風場，各機組應依17條規定設置

第十七條

風力發電機支撐結構物應使用 A型中亮度障礙燈，其設置應符合下列規定：

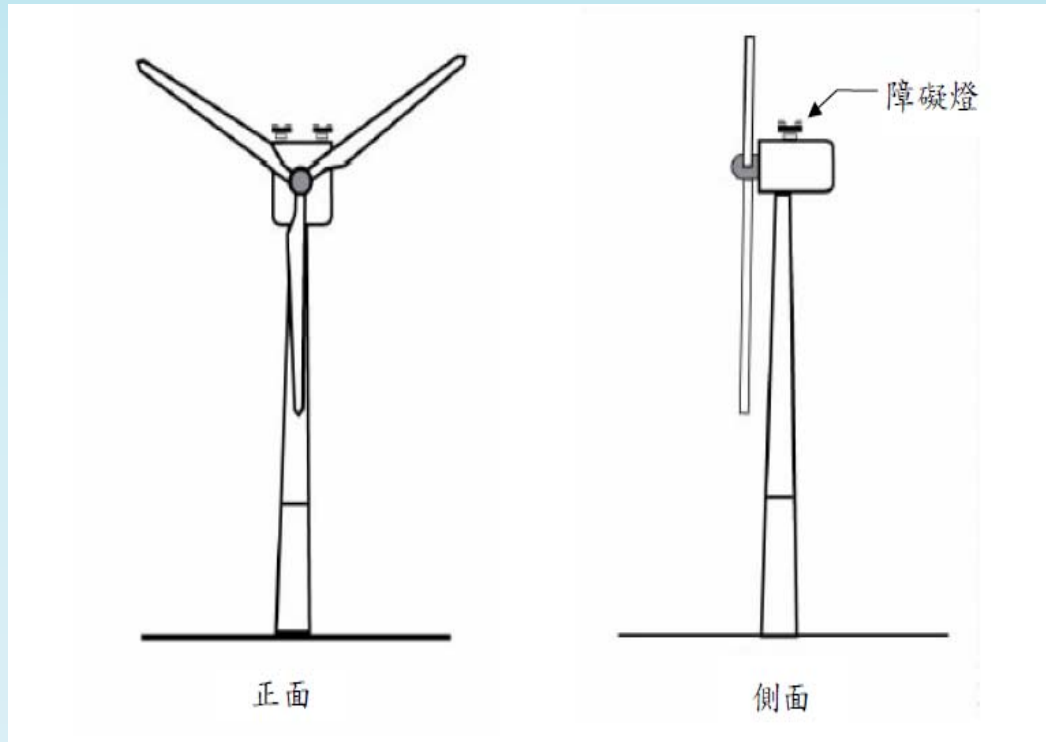
- 一、設置於 發電機支撐結構物之頂部。
- 二、水平方向設置間距應不超過九百公尺且位於最角落或最外圍之發電機支撐結構物應予設置。
- 三、使航空器由任何方向接近時，其操作人員得以辨識。
- 四、各障礙燈應同步閃光。

風力發電機支撐結構物得免設置航空障礙物標誌及中間層燈。

警戒系統

因應構想

▶ 障礙燈裝設位置



障礙燈裝設示意圖

▶ A型中亮度障礙燈特性

顏色		白
信號類型(閃燈頻率)		閃爍燈光 (20~60fp m)
在特定背景亮 光下障礙燈之 最大亮度(cd)	$>500\text{cd}/\text{m}^2$	$20000\pm 25\%$
	$50\sim 500\text{cd}/\text{m}^2$	$20000\pm 25\%$
	$<50\text{cd}/\text{m}^2$	$2000\pm 25\%$
垂直光束或散角		3° 最小值
當燈光垂直仰 角調整時，於 特定垂直仰角 之亮度(cd)	-10	3%，最大值
	-1	50%，最小 值 75%，最 大值
		100%，最小 值
	+6	-
	+10	-

參考資料：交通部民用航公局

A photograph of an offshore wind farm at sunset. The sky is a mix of blue and orange, with clouds catching the low sun. Several wind turbines are visible in the distance, and yellow substation structures are scattered across the dark blue sea. In the foreground, a large yellow substation structure is prominent, featuring a white cylindrical top and a lattice of yellow beams. The text "簡報完畢 敬請指教" is overlaid in the center in a large, white, sans-serif font.

簡報完畢
敬請指教