

單樁基礎沖刷預測模型之演進：從沖刷平衡深度到時間演進模型的回顧

張君名¹、李政達²

¹ 國立中央大學地球科學前瞻應用研究中心專案助理研究員

² 交通部運輸研究所運輸技術研究中心副研究員

摘要

離岸風電風機單樁基礎周遭局部沖刷為影響結構埋置深度、動態穩定性與長期疲勞壽命的關鍵水工議題。早期基礎防護設計高度依賴「靜態沖刷平衡深度」（如 1.3D 至 1.5D 規範值）的經驗公式，該類方法雖提供保守的工程安全包絡線，但其隱含水動力條件恆定且作用時間無限長的假設。由於忽略了真實海象中極端事件歷時有限、潮汐往復交替以及波浪主導的回淤（Backfilling）效應，靜態公式往往無法真實反映現場海床的動態演進與場址特異性（Site-specificity）。本文除系統性回顧單樁沖刷預測模型之演進外，並探討研究重心如何從恆定條件下「極限深度問題」轉向受歷時控制之「時間演進模型（Time-evolution models）」與「時間步進模型（Time-stepping models）」，深入剖析了時間尺度（Time scale）的物理意義，釐清沖刷與回淤在發展速率上的非對稱性，並結合大樣本的現地監測數據，說明地層非均質性（如高抗剪強度的黏土層）對實際坑深發展的限制作用。最後，統整高解析度數值模擬（如 CFD-DEM）與資料驅動（Data-driven）監測技術之最新進展，指出針對大直徑單樁、活床條件、潮汐遲滯效應及物理與數據耦合等領域，目前仍存在顯著的研究缺口，建議未來評估沖刷風險必須跨越單一靜態設計值的思維，邁向涵蓋時變外力、地質限制與即時資料校正之多層次動態預測框架，以達成具備全生命週期視野的工程動態決策。

一、緒論

近年離岸風電快速發展，單樁基礎（Monopile foundation）因施工相對成熟、成本具競爭力且適用於多數中淺水域場址，已成為目前最常見的基礎形式之一。然而，單樁周圍海床在波浪、潮流與波流共同作用下易發生局部沖刷（Local scour），進而改變基礎周圍地形、降低埋置深度、增加結構受力不確定性，並對基礎承載、動力反應（如自然頻率改變）與長期服役安全（疲勞壽命）帶來直接影響。近年相關研究亦指出，局部沖刷仍是離岸風電風機基礎設計與運維中最核心的議題之一（Li et al., 2023; Qu et al., 2024）。

早期單樁沖刷預測多建立在恆定水動力條件下的沖刷平衡深度（Equilibrium scour depth）概念上，並以經驗公式或規範化設計值作為工程判斷基礎（Det Norske Veritas, 2014）。

這類方法的優點在於形式簡潔、使用方便且對設計具有保守性。因此，被長期廣泛應用於離岸結構物初步設計與防沖刷保護配置設計。然而，沖刷平衡深度本質上對應的是特定波流條件在足夠長作用時間下的漸近極限（Asymptotic limit），而非真實海象條件下任一時刻必然出現的實際坑深。當極端事件（如風暴）持續時間有限，或外力條件隨潮汐與風暴過程不斷改變時，海床往往尚未發展至理論平衡狀態，外力即已轉弱或改向（Harris et al., 2010）。

因此，將單樁沖刷簡化為單一最大深度，雖可作為保守設計包絡，卻難以反映現地沖刷的真正歷時行為。現場量測與長期監測顯示，單樁周圍海床並非單調地趨向某一固定極限值，而是在潮汐反轉、波浪事件與背景輸沙共同影響下，呈現沖刷與回淤（Backfilling）交替發生的動態過程（Dixen et al., 2012）。尤其在具砂層—黏土分層或受限底床條件的場址，實際沖刷深度常明顯偏離傳統以均質鬆砂為前提的設計估算；但在無受限砂床與高動能條件下，現地坑深亦可能達到相當高的相對樁徑比。換句話說，問題不在於傳統平衡值的「錯誤」，而在於它無法單獨描述真實海床的時間演進與場址差異（Whitehouse et al., 2008）。

在此背景下，沖刷研究的重心逐步由「最終會沖多深」轉向「在給定歷時內會沖多深、何時開始回淤、殘餘坑深如何累積」。時間演進模型（Time-evolution models）因此被提出，用以透過沖刷平衡深度與時間尺度（Time scale）共同描述沖刷深度隨時間的發展歷程；工程界更進一步又發展出能處理連續海象序列的時間步進模型，以模擬潮汐週期、風暴歷時與回淤非對稱對長期坑深演變的影響。Harris 等人（2010）的 STEP（Scour Time Evolution Predictor）模型是此類工程化發展的重要代表，而近年的研究則進一步處理活床條件（Live-bed conditions）、大波流速比（Current-to-wave-velocity ratio）、潮流反轉與場址量測校驗等問題（Geng et al., 2024; Li et al., 2023）。

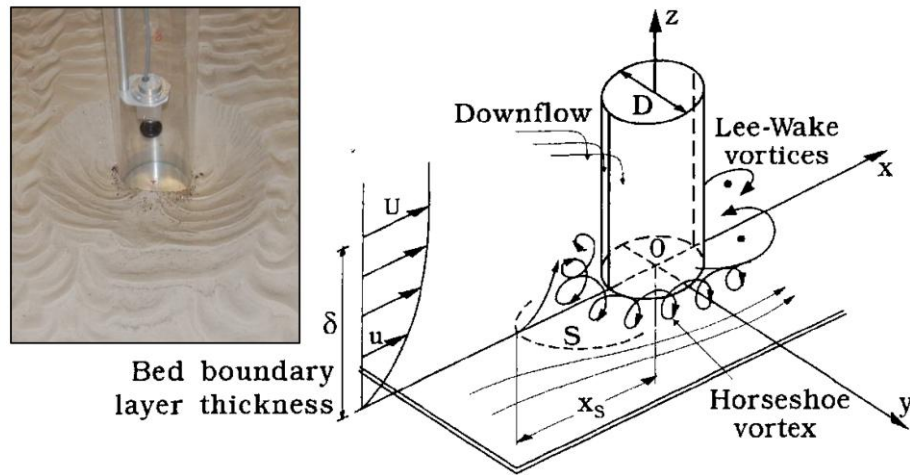
基於上述背景，本文回顧單樁基礎沖刷預測模型之演進，說明何以傳統沖刷平衡深度方法雖仍具工程價值，卻已不足以獨立支撐現代離岸風電風機基礎之沖刷風險評估；並進一步整理時間尺度、回淤機制、時間步進模型與現地監測所揭示之場址特異性，藉以建立從靜態設計值走向動態歷時預測的完整脈絡，並討論近年模型發展與主要研究缺口，作為後續離岸風電風機基礎沖刷評估與防護設計之參考。

二、單樁局部沖刷之物理基礎

2.1 單樁周圍之主要流場機制

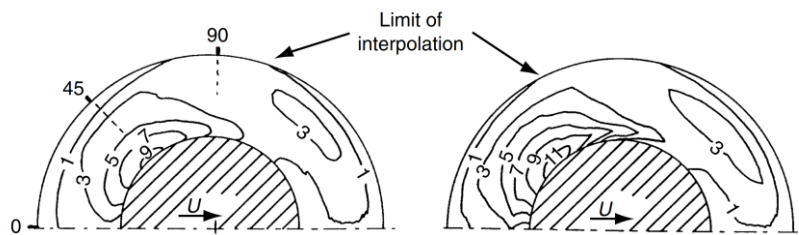
單樁基礎周遭之局部沖刷現象，其物理本質為海床沉積物受結構物阻礙近底流場（Near-bed flow field）所引發之淘蝕過程。當未受干擾之來流（Approaching flow）遭遇圓柱型樁體時，流線於樁前受阻產生減速，並於近床面處誘發顯著之向下流（Downflow）。此

向下流衝擊海床後，於樁體前端及兩側捲曲形成馬蹄形渦流（Horseshoe vortex），導致局部床面剪應力（Bed shear stress）急遽放大，如圖 1 所示。同時，流體繞經樁身兩側時因流線收縮產生局部加速，隨後於樁後發生邊界層分離（Boundary layer separation），進而形成交替脫落之尾流渦流（Wake vortices）。馬蹄形渦流主導了樁前沉積物之起動與淘刷，而尾流渦流則驅動樁後泥沙之捲吸與下游輸移，此二者交互作用構成了單樁周圍典型之局部冲刷坑形態。綜觀近代文獻，向下流、馬蹄形渦流與尾流渦流仍被視為解析單樁局部冲刷不可或缺之核心物理機制（Sumer and Fredsøe, 2002; Whitehouse, 1998），如圖 2 所示。



（圖片來源：Sumer and Fredsøe, 2002）

圖 1 單樁周圍局部冲刷機制示意圖



（圖片來源：Whitehouse, 1998）

圖 2 局部床面剪應力放大圖

基於水動力特性，單樁局部冲刷可歸納為純流（Current-only）、純波（Wave-only）及波流共同作用（Combined wave-current）三種流場態勢。儘管此三者皆具備上述之結構繞流特徵，其主導渦流結構與輸沙機制卻存在顯著差異。於純流環境中，樁前馬蹄形渦流與樁後尾流渦流得以持續穩定發展，促使冲刷坑呈現穩定且朝向上游擴展之幾何特徵；於純波環境中，流速與床面剪應力隨波浪相位呈週期性往復反轉，冲刷機制高度依賴於 Keulegan-Carpenter (KC) 數及波致振盪邊界層（Oscillatory boundary layer）特性；而波流共同作用則

疊加了波浪之往復擾動與背景海流之定向輸沙能力，此一複合機制為離岸風場中最為普遍卻亦最難以簡化解析之水動力條件 (Sumer and Fredsøe, 2002)。

2.2 清水沖刷與活床沖刷

依據遠域 (Far-field) 海床沉積物是否超越起動門檻，局部沖刷可嚴格劃分為清水沖刷 (Clear-water scour) 與活床沖刷 (Live-bed scour) 2 種傳輸體制 (Whitehouse, 1998)。清水沖刷發生於環境床面剪應力未達泥沙臨界起動剪應力 (Critical shear stress)，然樁周之局部渦流擾動已足以觸發近樁沉積物淘刷之情境。於此體制下，沖刷坑內泥沙呈單向流失而缺乏上游沉積物補給，坑深將隨時間推移緩慢且持續遞增，直至坑內之有效剪應力衰減至臨界值附近始趨於穩定。反之，活床沖刷則發生於遠域海床已普遍處於輸沙狀態，沖刷坑之演進伴隨著局部泥沙之逸散與上游輸沙之持續補給，其最終之平衡狀態屬一動態平衡 (Dynamic equilibrium)，而非單純之絕對靜止 (Breusers et al., 1977)。此 2 傳輸體制之差異，不僅決定了沖刷平衡深度之量級，亦深遠地影響了沖刷發展之時間尺度與回淤 (Backfilling) 行為 (Harris et al., 2010)。

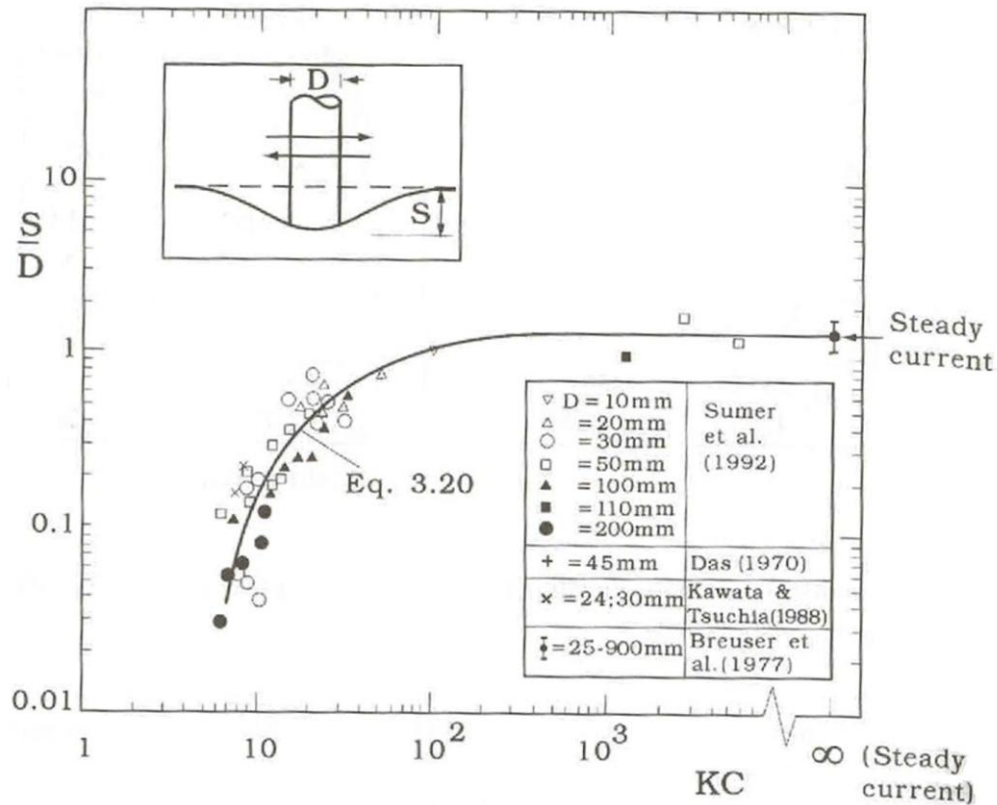
針對離岸風電工程實務，此分類具備關鍵之指導意義。倘若結構物座落於受強勁潮流主導且底床沉積物高度活躍之場址，活床條件下沖刷坑之演進與回填循環，實為全生命週期評估之首要考量；相對地，若場址背景輸沙率較低，卻受制於短延時之極端強流或劇烈波流交互作用，則極易誘發局部強烈淘刷而遠域補給匱乏之清水沖刷情境。由此可知，單一旦靜態之設計坑深實難以涵蓋多變之場址特异性 (Site-specificity)，過度簡化之假設往往無法真實反映多樣化之海床演變機制 (Qu et al., 2024)。

2.3 沖刷平衡深度的物理意義

理論上之「沖刷平衡深度」(Equilibrium scour depth, S_{eq})，定義為於特定且恆定之水動力條件下，沖刷坑歷經無限長時間發展後所趨近之漸近極限深度 (Asymptotic limit depth)。其物理本質並非指稱結構物生命週期內必然發生之實際坑深，而是當給定之流速、波高、週期及底床質條件維持足夠漫長之時距，致使坑內局部剪應力衰減、泥沙逸散率與上游補給率達致收斂平衡時所對應之理論最大值。準此言之，沖刷平衡深度屬一極限狀態 (Limit state) 之理論建構，而非對現地任一瞬時狀態之精確描述 (Sumer et al., 1992)，如圖 3 所示。

此一概念之重要性，在於其不僅構成了早期多數半經驗公式 (Semi-empirical formulas) 之核心輸出指標，亦為現代時間演進模型中不可或缺之標的深度 (Target depth)。然而，真實海洋環境之水動力條件鮮少恆定，多受制於潮汐往復、風暴事件及季節性波浪之連續變異，致使相應之目標平衡深度本身亦隨時間軸不斷游移。於此高度動態之系統中，現地觀測之實際沖刷深度 (Actual scour depth) 並非靜態停滯於單一 S_{eq} 值，而是呈現出不斷追

趕隨環境變動之「游移標的」之遲滯歷程。此一海床對外部強迫力（External forcing）變異反應不及之物理現象，即為後續沖刷預測模型必須引入時間尺度參數，並發展時間步進（Time-stepping）數值方法之根本學術理據（Harris et al., 2010）。



（圖片來源：Sumer and Fredsøe, 2002）

圖 3 恆定之水動力條件作用下之沖刷平衡深度理論值

三、靜態平衡公式的建立與工程化使用

3.1 純流、純波與波流共同作用下的經驗公式

單樁基礎沖刷預測之早期研究，主要聚焦於建立具備工程實用性之靜態沖刷平衡深度經驗公式。在純流（Current-only）環境中，經典文獻指出平衡坑深通常與樁徑 D 呈相同數量級；針對活床（Live-bed）條件，學者推導出約 $1.3D$ 至 $1.5D$ 之代表性參數範圍（Breusers et al., 1977; Sumer et al., 1992）。在純波（Wave-only）作用下，沖刷深度則高度依賴於 Keulegan-Carpenter (KC) 數、Shields 參數及相對粗糙度，且於低 KC 數條件下通常無顯著沖刷發生（Sumer et al., 1992）。針對波流共同作用（Combined wave-current），由於波浪引發床面振盪剪應力而海流驅動淨向泥沙輸運，實務上多採波流相對強度之組合參數（如流速比 U_{cw} ）對純流或純波之平衡公式進行折減與修正（Sumer and Fredsøe, 2001）。此類經

驗公式之核心特徵在於產出單一對應於恆定水動力條件之漸近極限值 S_{eq} ，而非描繪冲刷深度隨時間變化之動態歷程。

從工程發展史觀之，此類公式之歷史地位不容忽視。其將涵蓋渦流機制、泥沙輸運與床形演變之複雜物理過程，收斂為易於整合進設計流程之經驗關係式，使工程人員在缺乏長期現地觀測數據之條件下，仍能對結構物周遭之潛在最大冲刷坑建立初步之安全評估。此乃合理且必要之工程簡化；然其後續應用之侷限，多肇因於實務操作中對此類公式「適用邊界」之過度延伸 (Qu et al., 2024)。

3.2 1.3D / 1.5D 設計值之工程意義與侷限性

於離岸工程設計實務中，採用 1.3D 或 1.5D 作為單樁局部冲刷深度之設計基準長期扮演主導角色（如 DNV 等國際規範之建議值）(Det Norske Veritas, 2014)。此類無因次設計值廣獲青睞之主因，在於其數學形式簡潔且具備高度保守性，能直接與單樁之埋置深度、防冲刷保護層 (Scour protection) 厚度及結構整體穩定性檢核相結合。於初步設計階段，此方法能提供明確之極限包絡 (Envelope) 概念：即在無需精細解析複雜海象歷時變化的前提下，給定一個涵蓋潛在最大冲刷深度之保守估計。

然而，此類設計標準之侷限性亦甚為顯著。首先，其理論基礎隱含了「水動力條件恆定」且「作用時間趨於無限長」之前提假設；其次，該類公式大多建構於均質、非黏性 (Non-cohesive) 砂床之理想條件上，未能充分反映具備垂直異質性之分層土壤 (Layered soils)、高抗剪強度之黏土下伏層 (Clay underlayers) 或有限砂層厚度對冲刷發展之限制作用 (Whitehouse et al., 2008)。此外，靜態設計值無法揭示冲刷之起始時間、發展速率，亦無從描述海象能量衰減後之回淤 (Backfilling) 現象 (Harris et al., 2010; Sumer et al., 2013)。因此，1.3D 或 1.5D 應被嚴格定義為特定條件下之理論包絡極限，而非結構物服役期間必然發生之實際坑深。若逕將其視為現地預期冲刷深度，將無可避免地忽略時間尺度 (Time scale)、回淤機制及場址特异性 (Site-specificity) 對海床地形演進之綜合影響 (Whitehouse et al., 2011)。

3.3 靜態公式於離岸風電應用之不足

恆定流條件下之冲刷平衡深度概念，應用於橋墩或傳統河川工程領域具備高度之適用性；然離岸風電風機基礎所處之海洋環境，屬一包含潮汐往復交替、波浪非線性疊加、風暴事件歷時有限，且背景泥沙輸運具備顯著事件性與季節性特徵之高度動態系統。當外力條件 (External forcing) 隨時間發生劇烈變動時，冲刷坑之發展不再單調收斂於單一極限平衡值，而是於不同海象階段中，持續朝向不斷更迭之「目標平衡深度」進行動態調整 (Harris et al., 2010; Sumer et al., 2013)。靜態經驗公式解答的是「外力持續下的極限深度」；離岸風

電風機基礎設計更關注「在極端事件或長期海況下，沖刷深度如何變化」。此二者在物理意義與工程需求上存在本質之差異。

綜上所述，靜態公式之根本問題並非源於其數學架構之謬誤，而在於其論述範疇之不完整。其擅長界定極限狀態之保守包絡線，卻無力解析動態演進之歷時行為。為求對離岸風電單樁基礎進行更具合理性與經濟性之埋深評估、防護設計、疲勞分析及運維策略規劃，工程評估體系實須跨越「最終平衡深度」之靜態思維，進一步量化「沖刷發展速率」與「事件後回淤機制」。此一需求，正是推動沖刷預測技術邁向「時間演進模型（Time-evolution models）」之關鍵驅動力（Qu et al., 2024）。

四、時間尺度概念的引入與沖刷時間演進模型

4.1 從平衡深度 S_{eq} 到實際深度 $S(t)$

時間演進模型（Time-evolution models）的核心貢獻，在於將單樁基礎沖刷從傳統的「極限深度問題」轉化為「時變性問題（Time-dependent problem）」。在真實海洋環境中，工程設計所面對的並非靜態的沖刷平衡深度 S_{eq} ，而是某一特定時刻下受海象歷程帶來的實際沖刷深度 $S(t)$ 。實際坑深是否能逼近理論平衡值，不僅取決於當下外部水動力條件之強度，更取決於該水動力條件的「持續時間」。若極端事件的歷時明顯短於沖刷發展的特徵時間，則即便理論上的目標平衡深度極大，實際沖刷仍可能僅發展至初期階段；反之，唯有在水力條件穩定且持續時間足夠長的情況下，實際坑深始有機會逐漸趨近於平衡值（Harris et al., 2010）。

因此， S_{eq} 與 $S(t)$ 的差異不僅止於數學符號的不同，更代表著兩種截然不同的工程設計思維。前者為恆定條件下之極限包絡（Limit envelope），後者則為受歷時控制之動態過程量。此一觀念轉換對於離岸風電工程尤為關鍵，因風暴、季風、潮汐往復與波浪等不同海象事件具備迥異之時間尺度，而海床地形之演變本質上具備顯著的時間滯後性（Time lag）。海床的沖刷反應速率嚴格受制於水動力條件與底床物理性質之交互作用，而非瞬時響應至經驗公式所給定之理論極限值（Whitehouse, 1998）。

4.2 指數型時間演進方程式

在大量水工試驗與離岸工程應用中，單樁沖刷隨時間之發展軌跡最常被描述為一指數衰減關係（Exponential decay function）：

$$S(t) = S_{eq} \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{T} \right) \right) \dots\dots\dots(4-1)$$

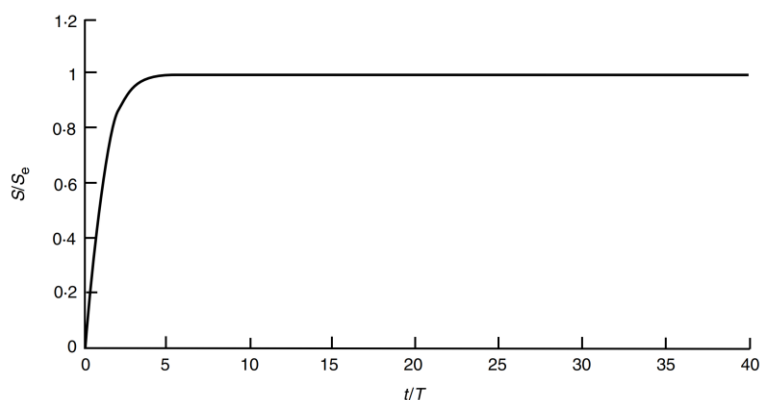
式中， $S(t)$ 為時間 t 時刻之實際沖刷深度， S_{eq} 為該水動力條件對應之沖刷平衡深度，而 T 則為時間尺度（Time scale）。此數學模型精確反映了沖刷過程之典型物理行為：

初期發展極為迅速，隨後淘刷率（Scour rate）逐漸衰減，並最終以漸近線形式趨於平衡值 (Sumer and Fredsøe, 2002)。Harris 等人 (2010) 所開發之 STEP (Scour Time Evolution Predictor) 模型即以此概念為核心，系統化地將其應用於純流、純波及波流共同作用等三類條件，並指出引入時間演進機制，乃是將沖刷預測技術推向真實海象應用之關鍵里程碑 (Harris et al., 2010)。

此一方程式之學術與工程價值在於，其成功將沖刷的「沖深大小（Magnitude, S_{eq} ）」與「發展速率（Rate, T ）」進行了數學解耦。 S_{eq} 界定了最終可能達到之幾何極限，而 T 則決定了趨近該極限之速率。此一分離使研究者得以獨立評估平衡坑深與海床反應速度，而無須將二者混淆於單一經驗常數中。於工程實務而言，這意味著即使兩個不同場址經計算得出相似的平衡坑深，只要其時間尺度相異，兩者在面對相同極端事件歷時下的實際沖刷風險亦可能截然不同 (Whitehouse, 1998)。

4.3 時間尺度的物理意義

時間尺度 T 之物理意義，表徵了沖刷坑對外部水動力條件改變的反應遲鈍程度或速率。若將 $t=T$ 代入前述指數方程式中，可得 $S(t) \approx 0.632S_{eq}$ ；換言之，時間尺度在工程上通常被定義為實際坑深發展至平衡值約 63.2% 所需之特徵時間 (Sumer and Fredsøe, 2002)。時間尺度並非純粹之數學擬合參數，而是綜合反映了底床材質可動性（Sediment mobility）、局部渦流系統強度與底床阻抗特性的物理指標。文獻綜合表明，波浪主導（Wave-dominated）條件下之沖刷時間尺度通常在數分鐘至數小時之譜，遠短於流主導（Current-dominated）條件；而在純流主導下，坑深之發展往往需歷經數天、數週乃至數月方能逼近平衡狀態 (Harris et al., 2010)，如圖 4 所示。



(圖片來源：Whitehouse, 1998)

圖 4 恆定之水動力條件作用下沖刷時間尺度

4.4 事件歷時與未達平衡現象

時間演進模型所帶來最重要之工程啟示，在於其從根本上揭示了在真實海洋環境中，「未達平衡 (Non-equilibrium)」實屬常態，而非特例 (Harris et al., 2010)。對多數離岸風電場址而言，風暴或極端海象之持續時間，通常遠不足以讓流主導的沖刷發展至其對應之目標平衡深度。此時，若依循傳統思維直接以 S_{eq} 作為該極端事件末期之實際坑深，將嚴重高估短延時極端事件對基礎造成的直接沖刷衝擊。相對地，若海床長期承受潮汐反覆作用且期間回淤 (Backfilling) 效應有限，則由多個非極端事件逐步累積之殘餘坑深，又可能被單一事件設計公式所低估 (Raaijmakers and Rudolph, 2008)。此現象說明了基礎設計的安全評估，不能僅仰賴外力之「峰值強度」，更必須將「事件持續時間」以及「波浪回淤之補償量」納入考量。

此一動態觀點促使沖刷評估與傳統結構極值設計 (Extreme value design) 思維產生本質上的區別。諸如波浪荷載等動力反應，可直接針對某一重現期 (Return period) 之極值條件進行結構檢核；然而，海床形態演變是一個累積過程，當前時刻之沖刷狀態，深受前期海況遺留之坑形幾何與殘餘深度的制約。忽略此種歷時性與累積性特徵，將導致對單樁基礎長期服役狀態與動態穩定性之判讀產生嚴重失真 (Qu et al., 2024)。

五、回淤機制與非定常海象下的時間步進模型

5.1 回淤的物理角色

當外部水動力條件衰減，抑或由強流主導狀態轉變為相對微弱之波浪或波流共存條件時，已形成之局部沖刷坑未必能維持原貌，而可能因周遭泥沙重新輸入坑內而逐步變淺，此一底床地形之恢復過程即為回淤 (Backfilling) (Sumer et al., 2013)。Sumer 等人 (2013) 透過系統性之試驗研究指出，回淤過程之最終漸近狀態，將趨向於該新海象條件對應之平衡沖刷狀態；易言之，回淤並非獨立於沖刷之外的物理機制，而是同一泥沙動力系統在目標平衡深度變淺時所展現之反向地貌調整。

然而，回淤與沖刷在時間演進上並非鏡像對稱。文獻實證表明，回淤之時間尺度與沖刷過程截然不同；在典型離岸風場常見之 Keulegan-Carpenter (KC) 數範圍內 ($KC < O(10)$)，回淤之發展速率通常遠慢於沖刷速率。此種「淘刷迅速、回淤緩慢」之時間非對稱性，對長期殘餘坑深具有決定性之影響：單一短延時之極端風暴事件可能迅速淘蝕出巨大深坑，但事件終止後，海床卻無法立即恢復原狀。因此，結構物在 2 次極端事件間所承受者，往往並非平坦之原始海床，而是一尚未完全回填之殘餘沖刷地形 (Dixen et al., 2012)。

5.2 時間步進法的基本概念

鑒於真實海象具備高度非定常 (Non-stationary) 特徵且伴隨沖刷與回淤之反覆交替，傳統基於恆定條件之單一閉式解 (Closed-form solutions) 已不敷工程所需，時間步進模型 (Time-stepping models) 遂成為預測歷時反應之必要工具 (Harris et al., 2010)。其基本概念係將連續之海象時間序列離散為微小時間步長，於每一時間步內，首先依據當下之波流條件計算新之目標沖刷平衡深度 $S_{eq,n}$ 與特徵時間尺度 T_n ，隨後依據當前之實際坑深 S_n 更新下一時刻之坑深 S_{n+1} 。若 $S_n < S_{eq,n}$ ，則系統處於沖刷階段；若 $S_n > S_{eq,n}$ ，則系統轉入回淤階段 (Raaijmakers and Rudolph, 2008)。藉此機制，沖刷坑深得以在漫長之海象歷程中被連續追蹤，而無須被迫對應單一恆定條件。

以數學形式表述，時間步進更新機制通常可寫為以下指數衰減形式：

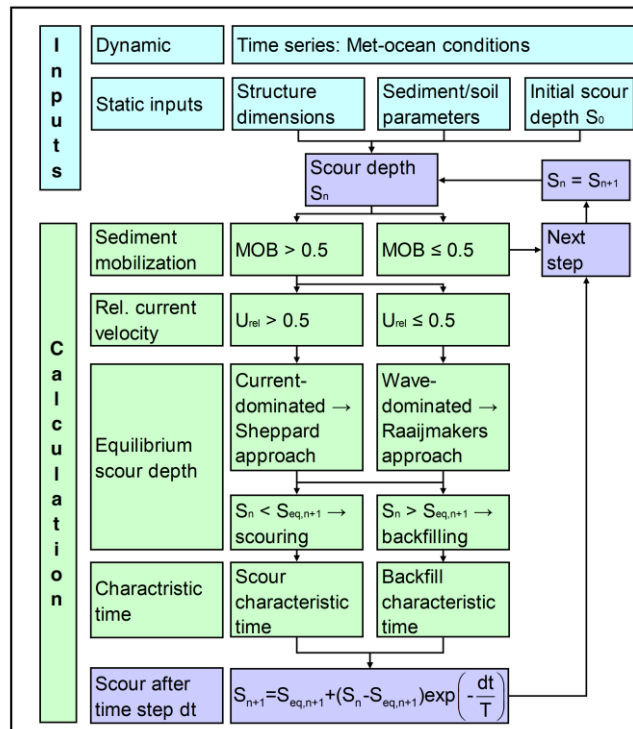
$$S_{n+1} = S_{eq,n} + (S_n - S_{eq,n})\exp(-dt/T_n) \cdots \cdots \cdots (5-1)$$

此數值架構之核心優勢，在於其能於同一框架下處理沖刷與回淤之動態切換，並可直接給定長時序之連續波流實測或後報資料。就工程應用而言，此方法使沖刷預測首度具備真正意義上之「歷時模擬 (Time-history simulation)」能力，使得多年海象序列、風暴過程與潮汐往復之累積效應得以被綜合評估 (Harris et al., 2010)。

5.3 STEP、WiTuS 與工程化動態模型

Harris 等人 (2010) 所建構之 STEP (Scour Time Evolution Predictor) 模型，為將時間演進概念推向工程實務應用之重要里程碑，如圖 5 所示。該模型可於純流、純波及波流共同作用等多元水動力條件下預測沖刷深度之時序發展，並已透過理想化測試、實驗室數據與現地量測資料進行廣泛之比對驗證。儘管研究指出該模型在初期淘刷成長速率上可能存在高估之現象 (需針對時間尺度進行適度校正)，其最大貢獻仍在於成功建立一可與長時序海象資料直接介接之實務運算框架，使沖刷風險評估不再僅侷限於單一靜態設計值 (Whitehouse, 1998)。

除 STEP 模型及 Deltares 發展之 WiTuS 等工程模型外，Dixen 等人 (2012) 亦提出另一種預測思維，其藉由三維計算流體力學 (CFD) 數值模擬預先建構特定基礎幾何之淘刷速率表 (Scour-rate tables)，再於長時間尺度上透過泥沙質量平衡與預計算之速率表進行動態預測。此類方法顯示，時間步進模型未必受限於單一經驗演進公式，亦可藉由預建構之水動力資料庫，保留更多複雜流場與坑形之空間資訊。這標誌著工程預測模型之發展方向，已不再僅限於將經驗公式置入時間軸，而是逐步嘗試讓「坑形之動態狀態」實質參與歷時預測過程 (Dixen et al., 2012)。



(圖片來源：Harris et al., 2010)

圖 5 STEP 模型流程圖

5.4 潮汐反轉與非定常輸沙

近年沖刷動態預測之另一項重要突破，在於進一步將潮汐往復與流向反轉所誘發之交替性沖刷與回淤現象（Ebb-flow tides）嚴謹納入模型考量（Geng et al., 2024）。Geng 等人（2024）之研究指出，在潮汐環境下，沖刷深度之成長並非單調遞增，而是隨半潮汐週期（Half-tide cycle）呈現反覆增減之波動現象。研究亦證實，對稱之潮汐訊號通常比不對稱潮汐引發更深之沖刷，而流向反轉所觸發之回淤效應，乃是控制潮汐條件下坑深發展歷程之關鍵機制。為此，該研究提出「正規化累積有效水流強度（Normalized cumulative effective flow intensity, NCEFI）」之創新概念，用以同時量化「有效沖刷期」與「有效回淤期」對最終坑深及動態發展歷程之淨影響（Geng et al., 2024）。

此類研究成果之學術與工程價值在於，其從物理本質上釐清了「潮流並非僅為恆定流之簡單反向重複」之事實。對單樁基礎而言，正反向之交替來流將使樁前與樁後區域輪替扮演主控沖刷區，導致局部坑形在時間與空間維度上呈現更為複雜之非對稱性（Asymmetry）。因此，若僅以單向恆定流公式近似或簡化整個潮汐序列，將無可避免地忽略了反轉期間之回淤與遲滯效應（Hysteresis），從而導致預測失真。此一發展不僅是對既有模型之微調，更意味著物理機制解析與預測範式（Paradigm）之根本性轉換（Geng et al., 2024）。

六、現地觀測對傳統模型的修正

6.1 現地觀測揭示之時變特徵

單樁基礎冲刷之研究若僅侷限於室內水槽試驗或理想化數值模型，往往容易過度簡化真實海洋環境之複雜性；真正對傳統「冲刷平衡深度」思維提出根本性挑戰的，乃是長期之現場監測數據（Field measurements）。Whitehouse 等人 (2008) 彙整了英國五座離岸風場（如 Barrow, Scroby Sands 等）的監測資料後指出，冲刷之發展具備顯著的場址特異性（Site-specificity），且不同底床條件下之坑深演變軌跡差異甚巨。此外，Dixen 等人 (2012) 於 Gunfleet Sands 風場的現地量測亦確切證實，單樁周圍之坑深會隨潮汐交替與波浪事件，反覆呈現冲刷與回淤（Backfilling）之動態循環，而非單調且不可逆地趨向某一固定極限深度。這些現地證據共同揭示了一項事實：真實海床之地貌演進並非在尋求單一之最終解答，而是在變動的外力作用下，不斷進行動態之自我修正 (Dixen et al., 2012)。

現地觀測對傳統冲刷理論最關鍵之修正，並非全盤否定「平衡深度」之概念，而是證明其作為單一設計指標之不足。冲刷平衡深度（ S_{eq} ）於工程設計上依然具備提供保守包絡邊界（Envelope boundary）之價值，然其絕非實際海況下海床反應。真實的場址風險實則源於坑深之歷時變化（Time-history）、海象事件之坑深，以及其對結構物疲勞受力之長期累積影響，而上述動態特徵皆無法僅憑單一靜態之 S_{eq} 予以完整表述 (Qu et al., 2024)。

6.2 地層分層與底床受限條件之影響

現地觀測所帶來的另一項重大修正，為對海床地質非均質性（Geological heterogeneity）的重新審視。傳統經驗公式多建構於「具備無限深度之均質鬆散砂床」之假設前提上；然而，Whitehouse 等人 (2008) 的實測分析表明，當海床表層砂土之下，存在抗剪強度較高的海相黏土（Marine clay）或冰磧層（Glacial till，如 Barrow 風場案例）時，冲刷之向下發展將受到嚴格限制，坑深往往遠小於理論預測值。相對地，在毫無地層限制之深厚砂床條件下（Unconstrained sandy sediments，如 Scroby Sands 風場），現地量測之最大坑深則可達約 1.38 倍樁徑（1.38D） (Whitehouse et al., 2008)。此現象表明，若將基於均質鬆砂推導出之平衡深度，簡單套用於具備分層特徵之底床，將無可避免地誤判實際可發展之最大坑深 (Whitehouse et al., 2011)。

對於離岸風電工程而言，基礎防護設計所面對的並非單一之表層粒徑分布，而是實際可被淘蝕之砂層厚度、黏土層之抗蝕強度，以及分層界面之幾何特徵。一旦砂層厚度有限，即便極端水動力條件足以對應更深之理論平衡深度，冲刷坑亦會因觸及高阻抗之黏土層而被迫終止。反之，若底床為深厚之活動鬆砂，則傳統之 1.3D 規範設計值反而未必具備足夠之保守裕度。這亦充分闡明了「實際冲刷通常小於理論預測」之論述，僅反映了部分場址受限於地質或時間尺度之統計傾向，絕不能視為普適之物理定律 (Whitehouse, 1998)。

6.3 大樣本風場分析與場址特異性

近代針對大樣本現地數據之分析，進一步確立了場址特異性在沖刷預測中之主導地位。Qu 等人 (2024) 回顧 Whitehouse 等人 (2011) 針對九座離岸風場、逾百支單樁基礎的綜合分析後指出，相對沖刷深度 (S/D) 在不同風場之間展現出顯著之空間變異性。此種變異無法單憑單一無因次變數予以概括，而是深受相對水深 (h/D)、相對粒徑、Keulegan-Carpenter (KC) 數，以及沉積物遷移率 (Sediment mobility) 等多重條件之耦合影響。此類大樣本研究之重要性在於，其以實測證據說明了：單樁局部沖刷並不存在一條放諸四海皆準之普適曲線，而是呈現出由特定場址條件所主導之多族群行為 (Multi-population behavior) (Qu et al., 2024)。

此一結論對沖刷預測模型之演進具有深刻意義。在論述模型發展時，重點不應僅止於「數學公式之複雜化」，而必須釐清模型演進之根本驅動力：真實且複雜的海洋世界從來不是單一條件。強烈的場址特異性迫使研究者與工程師必須超越單純的靜態平衡值，轉而深入探討時間歷程、地層限制、事件序列，並高度仰賴現地監測資料之校驗。否則，再為精巧之數學方程式，亦僅是將實驗水槽中之理想狀態，若強行使用於高度動態且不可預測之真實海洋環境中，從而失去工程指導之實質意義 (Qu et al., 2024)。

七、近年模型發展與研究缺口

7.1 從平衡值模型走向多參數歷程模型

近年的沖刷模型發展，已不再滿足於單一平衡深度 (S_{eq}) 或單一特徵時間尺度 (T) 之簡易表述。針對活床條件 (Live-bed conditions) 與高波流比 (Current-to-wave-velocity ratio) 之複雜環境，近代研究 (如 Porter, 2015 總結之多參數模型) 已逐步提出包含平衡坑深、時間尺度以及形狀係數 (Shape factor/index) 之三參數半經驗模型。此一發展旨在改善傳統單指數衰減公式在部分極端條件下，對坑深發展曲線擬合度不足的問題。這標誌著時間演進模型已從單純「引入時間軸」的初步階段，實質跨入「如何更精確描述時間軸發展軌跡」之高解析階段 (Qu et al., 2024)。

此一進展實則反映一項核心工程挑戰：真實的坑深發展歷程未必完美契合單一之指數曲線。特別是在活床條件、高波流比或多重水動力機制並行之情境下，沖刷坑之早期急速成長段、中期轉折段與後期趨近平衡段，往往呈現出截然不同的曲率特徵。若預測模型仍侷限於「單一數學函數貫穿全局」之思維，雖在工程應用上具備運算便利性，卻無可避免地會犧牲特定歷時階段之預測精度 (Porter, 2015)。

7.2 潮汐非定常與往復流條件

當前沖刷預測之另一項重要前沿，乃是針對潮汐非定常（Non-stationary）條件下之歷時行為解析。Geng 等人 (2024) 針對潮汐往復流（Ebb and flow tides）之研究，已成功將潮型、半潮週期及流速波形之對稱與非對稱性對坑深發展的影響納入量化分析，並提出「正規化累積有效水流強度（NCEFI）」概念以同時預測平衡深度與動態歷程。與此同時，Liu 等人 (2022b) 基於 CFD-DEM 之雙向耦合數值模擬，進一步重現了潮流加速、減速與反轉過程中的粒子運動遲滯（Hysteresis）、不可逆之淨位移以及沖刷與回淤的交替微觀機制。這顯示目前的研究焦點已從「平均或峰值流速量級」，實質轉移至「整體流速時序波形如何主導坑深歷程」（Geng et al., 2024）。

此類研究之工程價值極高，主因在於離岸風電場多座落於潮流顯著之海域，而真實潮流絕非僅是流速向量的單純正負切換。流向反轉前後的局部渦流系統重組、沉積物之回輸（Back-feeding）效應，皆會使實際坑深對流速歷程產生顯著的遲滯反應。若未來工程設計仍以單向恆定流去簡化或近似複雜的潮汐系統，在特定場址條件下，勢必面臨錯估坑深峰值與事件間殘餘坑深（Residual scour depth）之嚴峻風險（Geng et al., 2024）。

7.3 高解析數值模型之角色與侷限

高解析度數值模型，尤其是雷諾平均納維-斯托克斯方程式（RANS）、大渦模擬（LES）與 CFD-DEM 耦合技術，近年在單樁沖刷機制研究中扮演著愈發關鍵的角色。Liu 等人 (2022b) 之研究證實，CFD-DEM 已能從宏觀的坑形演變，一路向下解析至中微尺度的單一沉積物粒子運動，並能清晰揭示波流共存條件下反覆沖刷與回淤的細部力學機制。此類高算力模型之核心價值，在於其能洞察半經驗公式所無法觸及之物理黑箱，例如局部渦核結構之演化、流體-粒子受力路徑以及坑形之微觀重整過程（Qu et al., 2024）。

然而，受限於當前的計算科學發展，此類高解析模型於現階段仍難以直接取代工程實務所需之長時段歷時預測。究其原因：空間與時間解析度越高，所需之運算成本即呈幾何級數攀升。離岸風電工程真正迫切需求的，往往是涵蓋數十年海象序列下之坑深演化軌跡，而非僅限於單一短延時事件之精美流場可視化圖。申言之，若逕以 CFD-DEM 強行模擬長達數十年之真實海象，其龐大之運算時間與成本於實務上毫無可行性。因此，高解析數值模型目前最適切之定位，應為揭示微觀機制、校正簡化工程模型，抑或輔助建立「沖刷速率資料庫（Scour-rate tables）」，而非直接承擔全生命週期之歷時模擬任務（Liu et al., 2022b）。

7.4 監測技術、資料驅動方法與運維應用

除傳統物理機制與數值模型外，資料驅動（Data-driven）與人工智慧（AI）方法已開始大舉進入單樁沖刷監測與預測領域。近年研究（如 Dai et al., 2021; Li et al., 2023）已嘗試利

用風機塔架之自振頻率 (Natural frequency) 變化、振動訊號分析與領域適應方法，在缺乏海床直接測深設備之情況下，反向推演並辨識基礎的沖刷損傷程度。這條技術路線目前的發展定位，較接近於結構健康監測 (SHM) 與運維 (O&M) 決策輔助，尚無法完全替代前端的基礎設計公式。然而，此一趨勢強烈暗示：未來的沖刷工程將不再單純仰賴「設計階段之事前預測」，而是逐步過渡至「服役期間之在線辨識與模型動態更新」 (Li et al., 2023)。

其深遠的學術與工程意義在於：若未來能將現地監測數據、物理演進模型與資料同化 (Data assimilation) 技術深度整合，單樁沖刷評估將有機會從提供「一次性之靜態設計值」，進一步提升為「持續更新的場址數位分身 (Digital Twin)」。這對於大型離岸風場的資產管理尤為關鍵，因同一風場內不同單樁之坑深演變存在顯著的空間變異性，實難以由單一設計代表值予以全面概括 (Qu et al., 2024)。

7.5 主要研究缺口

綜合現有文獻與前沿發展，單樁基礎沖刷研究至少仍存在四項亟待突破之明顯缺口：

(1) 複雜水動力與大結構之演進框架：針對大直徑單樁 (Large monopiles)、活床條件與高波流比下之時間演進模型，目前仍缺乏經廣泛大尺度驗證之通用預測框架 (Qu et al., 2024)。

(2) 潮汐與記憶效應之工程化：潮汐反轉、流速波形非對稱性與事件序列之「記憶效應 (Memory effects)」雖已於近期文獻中被深入探討，但將其轉化為成熟且便於設計端使用之工程公式，仍有一段距離 (Geng et al., 2024)。

(3) 地質非均質性之整合：地層分層 (Layered beds)、有限砂層厚度以及非凝聚性與凝聚性混合底床 (Sand-clay mixtures) 對歷時坑深與時間尺度之限制作用，尚未被充分整合進通用之動態預測模型中 (Whitehouse et al., 2008; Porter, 2015)。

(4) 物理與資料驅動之耦合：現地監測技術與資料驅動方法雖發展迅猛，但如何將此類巨量服役數據與設計期之物理時間步進模型進行深度耦合，目前仍屬起步階段 (Li et al., 2023)。

因此，未來沖刷預測模型最值得投入的發展方向，已不再是單純尋找另一條更精確的「靜態平衡公式」，而是致力於建構一個能同時處理時變外力、回淤滯後、場址地質限制，並具備現地資料即時校正能力的「多層次動態預測框架」。真正成熟的單樁沖刷評估體系，不應僅止於回報一個最大的極限坑深，而應能全面回答：在何種海象條件下觸發？形成與回填的速率為何？事件後殘餘深度多少？以及這些地貌變動對結構長期服役與疲勞壽命之實質影響。至此，沖刷預測技術方能真正由單一之「靜態設計值」，蛻變為具備全生命週期視野之「工程動態決策」 (Qu et al., 2024)。

八、結論與建議

單樁基礎局部冲刷之預測技術，已從早期的「靜態平衡公式」發展至現代的「動態時間演進模型」，此一演進不僅是數學描述的精進，更是工程思維的根本性轉換 (Qu et al., 2024)。過去廣泛依賴的 $1.3D$ 或 $1.5D$ 冲刷平衡深度經驗值，雖能為初步設計提供相對簡便且保守的包絡線 (Det Norske Veritas, 2014)，卻忽略了真實海洋環境中極端海象的有限歷時、波浪主導的回淤效應，以及地質分層（如黏土下伏層）的物理限制作用 (Whitehouse et al., 2008; Sumer et al., 2013)。若逕將靜態極限值視為服役期間必然發生之實際坑深，將無可避免地導致對基礎安全裕度與防護需求的誤判。

時間尺度 (Time scale) 概念的引入與時間步進 (Time-stepping) 模型的應用，成功將冲刷「幾何極限」與「發展速率」進行了解耦 (Harris et al., 2010)。大量室內試驗與長期現地觀測皆證實，海床受制於潮汐往復、風暴事件及季節性波浪的交替作用，處於不斷冲刷與回填的動態循環中，「未達平衡 (Non-equilibrium)」實屬海洋地貌演變之常態 (Harris et al., 2010; Diken et al., 2012)。同時，大樣本風場實測數據亦強烈表明，冲刷發展具備高度的場址特異性，不存在單一放諸四海皆準的普適曲線 (Whitehouse et al., 2011; Qu et al., 2024)。

展望未來，冲刷預測模型必須持續整合複雜水動力（如潮汐流速反轉的遲滯效應）、地層非均質性，並結合高解析度數值模型（如 CFD-DEM）的微觀機制洞察，以及資料驅動 (Data-driven) 與結構健康監測技術 (Liu et al., 2022b; Li et al., 2023; Geng et al., 2024)。唯有建構包含時變外力、回淤滯後與場址地質限制的多層次動態預測框架，離岸風電風機基礎的冲刷風險評估，方能真正從單一的「靜態設計值」，蛻變為具備全生命週期視野的「工程動態決策」 (Qu et al., 2024)。

參考文獻

1. Breusers, H. N. C., G. Nicollet, and H. W. Shen. "Local scour around cylindrical piers." *Journal of Hydraulic Research* 15, no. 3 (1977): 211-252.
2. Dai, S., B. Han, B. Wang, J. Luo, and B. He. "Influence of soil scour on lateral behavior of large-diameter offshore wind-turbine monopile and corresponding scour monitoring method." *Ocean Engineering* 239 (2021): 109809.
3. Det Norske Veritas (DNV). *Design of Offshore Wind Turbine Structures*. Offshore Standard DNV-OS-J101, 2014.
4. Diken, F. H., M. Diken, J. Pedersen, and J. F. Dahl. "Scour development around offshore wind turbine foundation: field measurement and analysis." In *Proceedings of the 6th International Conference on Scour and Erosion (ICSE6)*, Paris, France, 2012.
5. Geng, Fei, Wenxian Yang, Sadegh Nadimi, and Zhiqiang Hu. "Development and prediction of scour around offshore wind turbine monopile foundations in ebb and flow tides." *Ocean Engineering* 311

(2024): 118905.

6. Guan, D.-W., Y.-X. Xie, Z.-S. Yao, Y.-M. Chiew, J.-S. Zhang, and J.-H. Zheng. "Local scour at offshore windfarm monopile foundations: A review." *Water Science and Engineering* 15, no. 1 (2022): 29-39.
7. Harris, J. M., R. Whitehouse, and T. Benson. "The time evolution of scour around offshore structures." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering* 163, no. 1 (2010): 3-17.
8. Li, J., Y. Guo, J. Lian, and H. Wang. "Mechanisms, assessments, countermeasures, and prospects for offshore wind turbine foundation scour research." *Ocean Engineering* 281 (2023): 114893.
9. Liu, Q., Z. Wang, N. Zhang, H. Zhao, L. Liu, K. Huang, and X. Chen. "Local scour mechanism of offshore wind power pile foundation based on CFD-DEM." *Journal of Marine Science and Engineering* 10 (2022b): 1724.
10. Porter, K. E. Seabed scour around marine structures in mixed and layered sediments. EngD Thesis, University College London, UK, 2015.
11. Qu, L., H. An, S. Draper, P. Watson, M. Zhao, J. Harris, R. Whitehouse, and D. Zhang. "A review of scour impacting monopiles for offshore wind." *Ocean Engineering* 301 (2024): 117385.
12. Raaijmakers, T. C., and D. Rudolph. "Time-dependent scour development under combined current and waves conditions - laboratory experiments with online monitoring technique." In *Proceedings of the 4th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-4)*, Tokyo, Japan, 2008.
13. Sumer, B. Mutlu, and Jørgen Fredsøe. *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. Singapore: World Scientific, 2002.
14. Sumer, B. Mutlu, Jørgen Fredsøe, and N. Christiansen. "Scour around vertical pile in waves." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 118, no. 1 (1992): 15-31.
15. Sumer, B. Mutlu, Thor U. Petersen, Luca Locatelli, Jørgen Fredsøe, Rosaria E. Musumeci, and Enrico Foti. "Backfilling of a scour hole around a pile in waves and current." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 139, no. 1 (2013): 9-23.
16. Whitehouse, R. J. S. *Scour at marine structures: A manual for practical applications*. London: Thomas Telford, 1998.
17. Whitehouse, R. J. S., J. M. Harris, J. Sutherland, and J. Rees. "An assessment of field data for scour at offshore wind turbine foundations." In *Proceedings of the 4th International Conference on Scour and Erosion*, Tokyo, Japan, 2008.
18. Whitehouse, R. J. S., J. M. Harris, J. Sutherland, and J. Rees. "The nature of scour development and scour protection at offshore windfarm foundations." *Marine Pollution Bulletin* 62, no. 1 (2011): 73-88.