

不同安裝流量對負壓沉箱基礎抗拉拔承載力之影響

郭玉樹^{1*} 林啟聖² 楊捷有³ 陳威廷⁴ 許家維⁵

摘要

垂直拉拔承載力為離岸風機多腳基礎支撐結構重要檢核項目，多腳基礎常以樁基礎提供垂直阻抗，而對於深水域之多腳支撐結構，亦可採用負壓沉箱基礎作為基礎型式。本研究以1-g模型試驗模擬沉箱基礎施予負壓吸力進行安裝之過程，再對沉箱施加拉力以了解沉箱基礎變位與沉箱內部吸力之關係。本研究結果顯示，負壓沉箱內部之負壓吸力與沉箱基礎所受之拉力皆隨垂直位移增加而呈現先增後減之變化。本實驗小尺寸沉箱模型受拉力作用下，當垂直位移達約2/3倍裙翼長時，沉箱基礎可發揮極限拉拔力。而模型沉箱基礎之極限拉拔力隨著安裝流量增加而呈現減少之趨勢。

關鍵詞：負壓沉箱，離岸風力發電，拉拔承載力

1. 前言

負壓沉箱基礎為一頂部封閉、底部開放之鋼製圓柱結構，當沉箱降至海床面後，藉由在沉箱與海床間的封閉空間抽水，使沉箱內部產生負壓造成沉箱向下貫入土壤，如圖1所示。

沉箱早期多應用於船舶錨定、海上浮式結構物或離岸鑽油平台(Senpere & Auverge,

1982; Colliat *et al.*, 1995, 1996, 1997; Colliat & Foulhoux, 1998; Andersen *et al.*, 2005)。負壓沉箱基礎應用於離岸風電時分為單腳與多腳沉箱基礎，單腳負壓沉箱基礎之工程設計考量主要以側向承載力及穩定性為檢核重點。而多腳沉箱基礎因多腳幾何結構，使得基礎迎向外力作用側之沉箱受向上拉力，另一側則受向下壓力(圖2)。由於基礎之垂直向下承載力多遠高於受

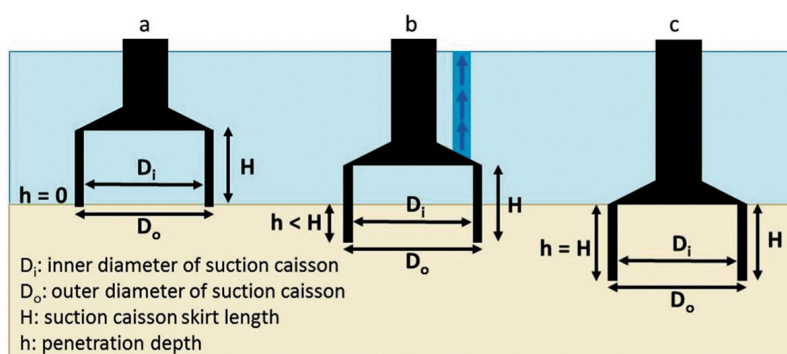


圖1 負壓沉箱安裝過程示意圖(本研究繪製)

¹國立成功大學水利暨海洋工程學系 教授

²國立成功大學水利暨海洋工程學系 博士候選人

³睿泰工程顧問有限公司 工程師

⁴國立成功大學水利暨海洋工程學系 碩士研究生

⁵國立成功大學水利暨海洋工程學系 大學部專題研究生

*通訊作者 E-mail: kuoyushu@mail.ncku.edu.tw

收到日期: 2019年02月14日

修正日期: 2019年06月06日

接受日期: 2019年07月02日

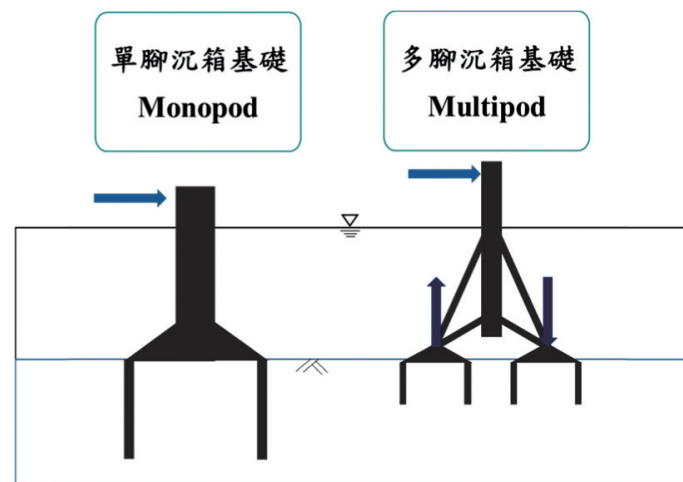


圖2 單腳與多腳負壓沉箱基礎受力示意圖(本研究繪製)

垂直向上作用力之拉拔承載力(拉拔力)，因此拉拔力檢核為多腳負壓沉箱基礎之主要設計檢核項目之一。

離岸風力發電首度採用單腳負壓沉箱基礎之案例為2002年丹麥的Frederikshavn離岸風場，圖3為Universal Foundation公司、DONG Energy公司(現為Ørsted)和丹麥奧爾堡大學(Aalborg University)共同合作之示範離岸風場。示範風機安裝於近岸水深4公尺處，沉箱外徑 $D_p = 12$ m、裙翼長 $H_p = 6$ m，總重135噸，搭載Vestas V90 3 MW風機(Ibsen & Brincker, 2004)。2009年Universal Foundation公司與DONG Energy公司將單腳負壓沉箱基礎應用於丹麥Horns Rev 2離岸風場之海氣象觀測塔。此海氣象觀測塔於2015年除役。2013年Universal Foundation公司再於英國Dogger Bank East離岸

風場安裝單腳負壓沉箱基礎海氣象觀測塔。2014年DONG Energy公司於德國離岸風場Borkum Riffgrund 1首次安裝多腳負壓沉箱基礎離岸風場。風場水深為25 m，沉箱外徑 $D_p = 8$ m、裙翼長 $H_p = 8$ m。圖4為塔架結合三腳沉箱基礎之支撐結構。2018年5月歐洲海上風電部署中心(European Offshore Wind Deployment Centre, EOWDC)於蘇格蘭Aberdeen Bay完成9支8.4 MW以及2支8.8 MW多腳負壓沉箱基礎離岸風機，其中一座基礎安裝時間僅耗時2小時40分鐘，為目前離岸風機多腳負壓沉箱基礎最快安裝紀錄；同年7月，Ørsted公司於德國北海離岸風場Borkum Riffgrund 2完成20座多腳負壓沉箱基礎離岸風機。由負壓沉箱基礎之離岸風機開發現況顯示，負壓沉箱基礎極具潛力可作為大型離岸結構物之基礎型式。



圖3 丹麥Frederikshavn風場負壓沉箱基礎安裝前後實景(Ibsen & Brincker, 2004)



圖4 Borkum Riffgrund 1離岸風場套管式負壓沉箱基礎施工實景(Ørsted company website, 2014)

對於多腳負壓沉箱基礎，當沉箱基礎快速受拉力作用時，沉箱內部將產生負壓，因此於計算拉拔力時與一般設計摩擦樁基礎之計算方式不同，須將沉箱內部之吸力納入分析考量。然而，負壓安裝過程之貫入速率將改變沉箱內外之土壤狀態，影響沉箱受拉力時沉箱內部吸力發展，亦直接影響沉箱基礎之極限拉拔力。

本研究以室內模型試驗模擬沉箱基礎受不同負壓吸力之安裝過程，再對模型沉箱施予垂直拉力，於沉箱受拉時量測負壓沉箱基礎內部吸力反應，評估不同安裝吸力及安裝流量對沉箱極限拉拔力之影響，以作為後續沉箱基礎設計與施工規劃應用。

2. 負壓沉箱安裝臨界吸力

Olson *et al.* (2003)以模型試驗對沉箱基礎錨定於黏土之孔隙壓力消散特性與拉拔阻抗進行研究，其模型沉箱外徑為10.2 cm；裙翼長為91 cm。研究結果顯示負壓沉箱安裝完成後，黏土內產生之超額孔隙水壓隨時間逐漸消散，沉箱之垂直拉拔承載力隨時間增加。Tran *et al.* (2004)、Villalobos (2007)、Guo *et al.* (2012)、Lian *et al.* (2014)等人之研究均提及負壓沉箱基礎於安裝過程中可能引致滲流破壞或沉箱內部土壤抬升等現象，導致基礎安裝失敗或影響基礎承載力降低。而沉箱基礎安裝時之土壤滲流現象主要受沉箱內外之壓力梯度變化，當採用

過大之負壓吸力進行安裝時，將造成沉箱內部向上滲流速度太快，使土體失去穩定而發生滲流破壞或土體抬升現象。因此負壓沉箱安裝時之抽水負壓應避免超過臨界值 Δu_{crit} 。Tran *et al.* (2004)比較不同安裝流量下，不同尺寸沉箱於緊密砂土安裝時之滲流反應，結果顯示沉箱壁體厚度與沉箱外徑比值小於1%時，安裝流量不會對沉箱安裝過程產生影響；當壁體厚度與沉箱外徑比值大於1%時，安裝流量則會加劇沉箱內部土體抬升反應。Villalobos (2007)以室內砂箱模型試驗結果說明沉箱安裝使用之負壓需小於臨界負壓吸力，以避免沉箱內部發生土壤滲流破壞造成安裝失敗。Guo *et al.* (2012)以間歇抽水之方式安裝負壓沉箱於黏土中，並探討沉箱內部土壤抬升現象。其研究指出以間歇抽水方式釋放沉箱內部負壓可降低沉箱內部土體抬升之狀況。Lian *et al.* (2014)則針對沉箱安裝於砂土層中之貫入阻抗及安裝吸力需求，以室內試驗進行研究。

Guttormsen *et al.* (1999)、Feld (2001)、Senders & Randolph (2009)等學者提出負壓沉箱安裝於砂土中之臨界吸力 Δu_{crit} 計算公式。Guttormsen *et al.* (1999)與Feld (2001)建議臨界吸力可由沉箱之長徑比(h/D)及土壤有效單位重 γ' 求得。長徑比為沉箱裙翼貫入深度 h 與沉箱內徑 D 之比值

$$\Delta u_{crit} = A \times \left(\frac{h}{D} \right)^{-B} \times h \times \gamma' \quad (1)$$

其中， A 、 B 為半經驗參數。對於長徑比 h/D 介於 $0 < h/D < 4$ 時，Guttormsen *et al.* (1999) 認為 A 值為 1.48， B 值為 0.26。而 Feld (2001) 以數值模擬探討負壓沉箱之臨界安裝吸力，其研究成果建議 A 值為 1.32， B 值為 0.25。

Sender & Randolph (2009) 認為臨界吸力隨基礎貫入深度之關係並非以冪級數表示，其將貫入深度對臨界吸力之影響以反正切函數表示，如下式

$$\Delta u_{crit} = \left\{ \pi - \tan^{-1} \left[5 \left(\frac{h}{D} \right)^{0.85} \right] \times \left(2 - \left(\frac{2}{\pi} \right) \right) \right\} \times h \times \gamma' \quad (2)$$

透過負壓沉箱臨界吸力計算公式，對於給定之負壓沉箱裙翼長 H 、沉箱內徑 D 、土壤有效單位重 γ' 等條件之負壓沉箱安裝案例，可計算得負壓沉箱於不同貫入深度時對應之臨界吸力，如圖 5 ($H = 7.5$ cm、 $D = 10$ cm、 $\gamma' = 8.79$ kN/m³)。以圖 5 之假設條件比較各半經驗計算所得之臨界吸力，當沉箱基礎完全貫入時，Guttormsen *et al.* (1999) 提出之方法可算得最大之臨界吸力；其次為 Feld (2001) 建議計算所得之結果，Sender & Randolph (2009) 建議方法計算結果最小。上述比較顯示，Sender & Randolph (2009) 提出的臨界吸力經驗公式較另外兩位學者所計算之結果更為保守。

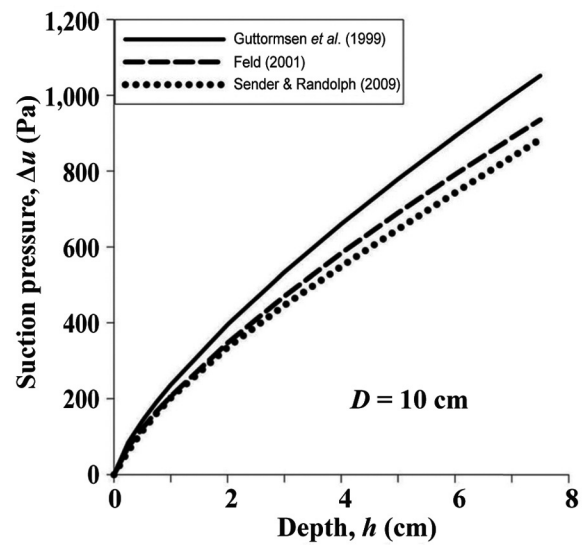


圖 5 不同經驗方法計算之臨界吸力隨沉箱基礎貫入深度之關係(本研究繪製)

3. 1-g 縮尺模型試驗

3.1 模型試驗土壤條件

本研究參考中能發電股份有限公司(2017)、台灣電力股份有限公司(2009a、2009b)、臺灣海洋科技研究中心(2012)、海峽風電股份有限公司籌備處(2017a、2017b)之海域土壤鑽探資料，我國西部海域多為粉土質細砂，故本試驗初步選取通過 #100 之渥太華標準篩(粒徑 < 0.15 mm)作為試驗土樣，其粒徑分布曲線如圖 6。

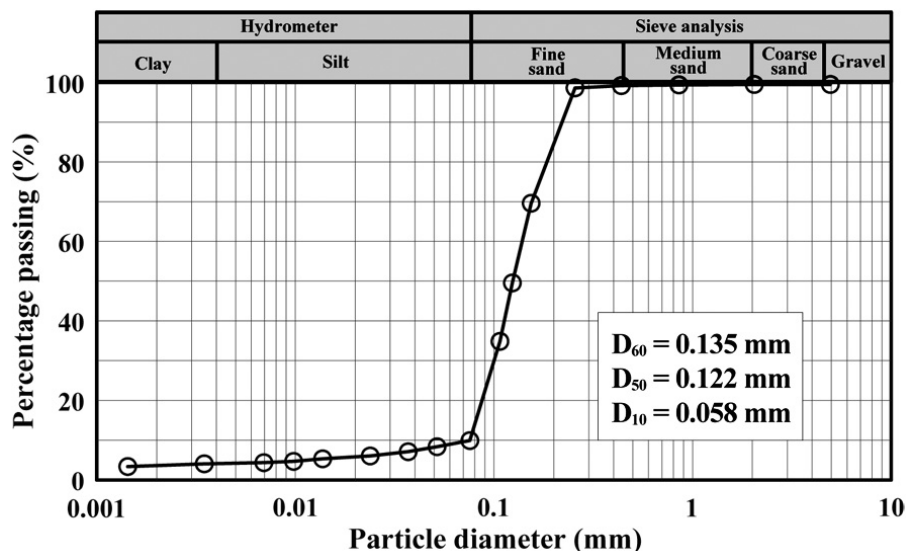


圖 6 試驗土樣粒徑分布曲線(本研究繪製)

試驗土樣基本物性試驗參數如表1所示，土樣比重 G_s 為2.60，中值粒徑 D_{10} 為0.122 mm，均勻係數 C_u 為2.353，曲率係數 C_c 為1.277，屬於均勻細砂。由土壤相對密度試驗結果求得試驗土壤最小乾土單位重 $\gamma_{d,min}$ 為12.77 kN/m³，最大乾土單位重 $\gamma_{d,max}$ 為16.26 kN/m³。由各鑽孔標準貫入試驗結果顯示，彰濱離岸風場淺層15公尺內之土壤平均SPT-N值約為10，參考Peck *et al.* (1953)之建議，彰濱離岸風場表層砂質土層主要為疏鬆程度，因此本試驗將試驗土壤相對密度設定約為40%，並依振動台試驗結果計算

表1 本研究模型試驗標準砂之物性參數(本研究整理)

| | |
|---------------------------------------|-------|
| 土壤比重 G_s | 2.60 |
| D_{60} (mm) | 0.135 |
| D_{50} (mm) | 0.122 |
| D_{10} (mm) | 0.058 |
| C_u | 2.353 |
| C_c | 1.277 |
| $\gamma_{d,max}$ (kN/m ³) | 16.26 |
| $\gamma_{d,min}$ (kN/m ³) | 12.77 |

試驗土樣乾土單位重為13.95 kN/m³，試驗土壤滲透係數 k 為 7.83×10^{-3} cm/s。

3.2 負壓沉箱實驗模型配置

本研究以室內1-g模型試驗模擬負壓沉箱安裝至拉拔破壞過程，實驗配置說明如圖7。本試驗使用之砂箱尺寸箱內長寬為52 cm，高度71.8 cm，為方便觀察負壓沉箱模型於安裝及受拉力過程可能產生之土壤反應，本研究使用壓克力製作透明箱體。土樣配置時依據設定之相對密度計算所需乾土重，將乾砂分次秤重後逐層鋪設至預設高度，以確保每層土壤之相對密度相同。將砂土表面整平後，由底部連通水槽，均勻向上滲透浸水避免砂土擾動，最後以真空幫浦抽氣以達到土壤飽和。圖8為本研究砂箱內部砂土布設完成之狀態。

本試驗負壓沉箱模型以壓克力材質製作，模型裙翼長 $H_m = 7.5$ cm，內徑 $D_m = 10$ cm，沉箱厚度 t_m 為0.5 cm，長徑比 H_m/D_m 為0.75，如圖9所示。砂箱內土壤達飽和階段後，即進行沉箱模型安裝。將負壓沉箱模型置於飽和砂土面，

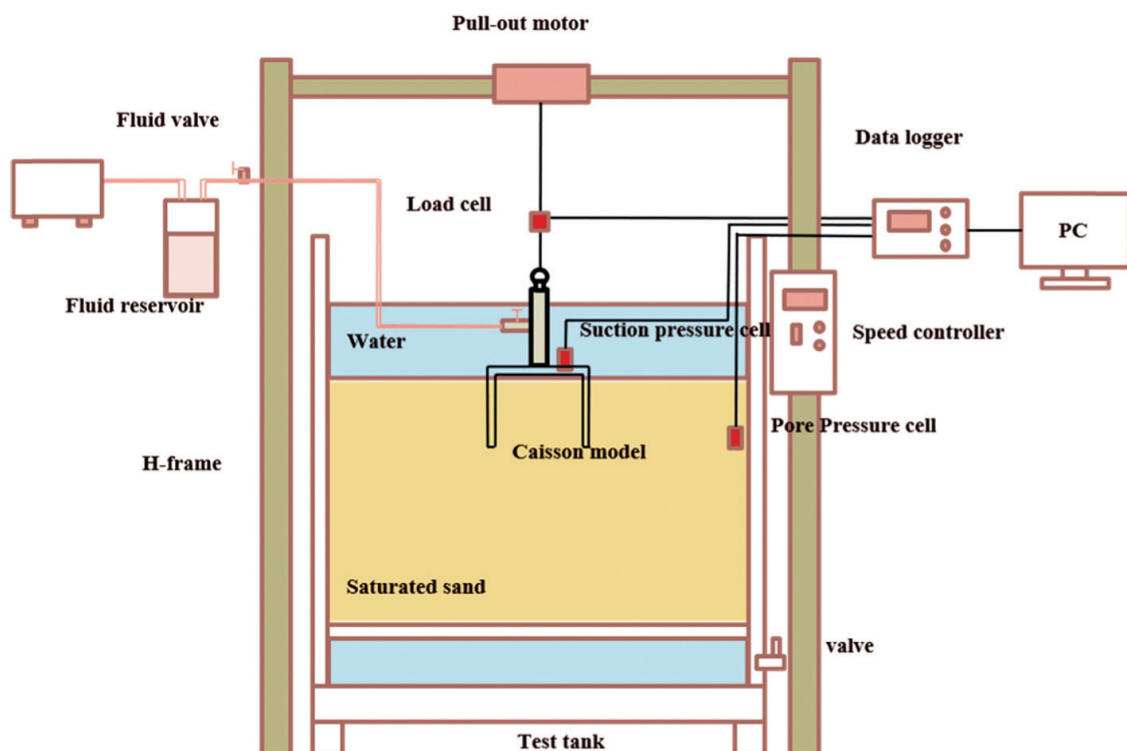


圖7 負壓沉箱基礎拉拔承載力模型配置示意圖(本研究繪製)

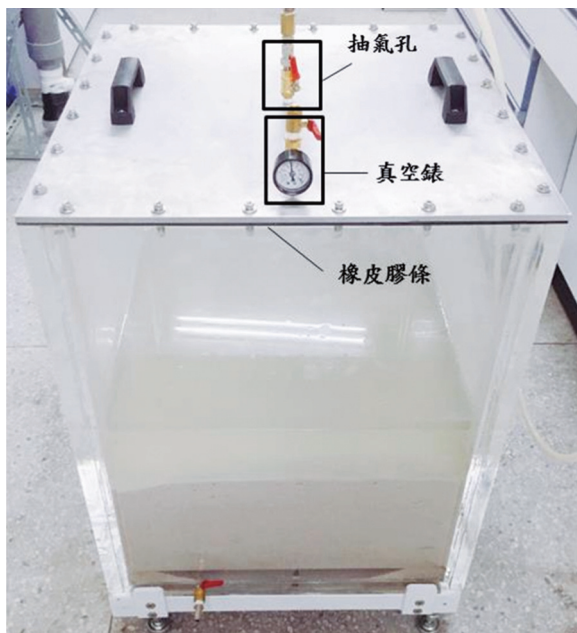


圖8 砂箱上部密封並開始抽氣飽和作業(本研究繪製)

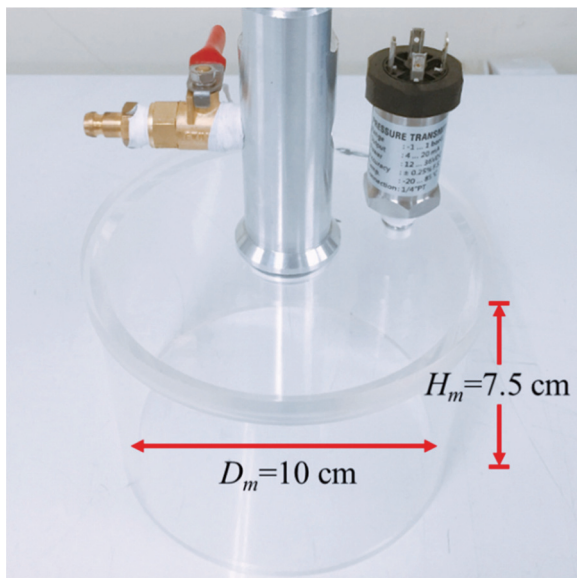


圖9 負壓沉箱模型尺寸及外觀(本研究繪製)

初時利用模型自重向下貫入，此階段皆開啟沉箱上部閥門保持沉箱內外壓力相同。當沉箱模型以自重初步貫入後，透過負壓將沉箱內部之水抽出，直到沉箱裙翼完全貫入土中，以完成安裝。

本實驗採用定速率控制馬達對沉箱模型施以垂直拉力，馬達懸吊掛勾，並於下方連接拉力計，再與負壓沉箱模型連接，以量測模型受拉力作用時之極限拉拔力。為使負壓沉箱模型

試驗能達到垂直位移控制，本研究設計速度控制馬達拉力系統包含下列3個部分：(1) H型鋁擠型架；(2) 速度控制器；(3) 拉力馬達及吊鉤。H型鋁擠型架為支撐馬達及提供向上拉拔沉箱時造成之反力，寬度60 cm，高度147 cm。速度控制器可調整拉拔速率每秒10 mm至100 mm。拉力馬達及吊鉤最大垂直荷重為60 kg，最大垂直位移為1,000 mm。

本研究使用水壓計量測模型安裝過程及受拉過程沉箱內部之水壓變化，壓力量測範圍由-100 kPa至100 kPa。試驗時預先將水壓計裝設在負壓沉箱模型之頂蓋孔，如圖10中A處，透過量測沉箱內部水壓 Δu ，可即時取得沉箱安裝過程及受拉過程之內部吸力反應。

3.3 作用力條件及尺寸效應

Houlsby *et al.* (2005)彙整模型試驗結果說明負壓沉箱基礎之拉拔速率對極限拉拔力之影響，於沉箱受拉過程中，對沉箱施以拉拔速率為5 mm/s至100 mm/s。本研究參考Houlsby *et al.* (2005)之模型試驗條件，採用10 mm/s之拉拔速率，記錄沉箱基礎受拉力作用時之內部吸力反應。

砂箱模型試驗時須避免砂箱過小造成安裝沉箱時滲流場受到砂箱邊壁影響，即砂箱邊壁處不發生壓力狀態改變。由白奴利定律可知當土體內部滲流流速發生變化時，水壓亦將發生變化，因此，本研究於砂箱邊壁裝設水壓計，藉由量測安裝及拉拔過程中砂箱邊壁處之水壓變化(Δu_p)，以評估試驗是否受到砂箱邊壁影

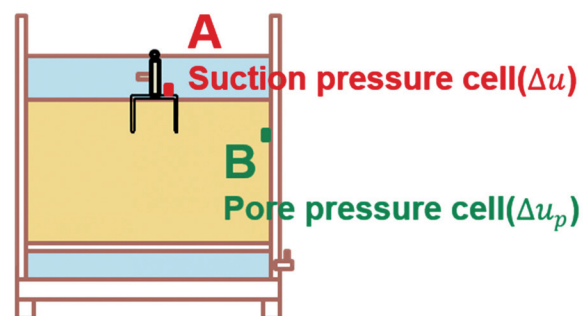


圖10 負壓沉箱模型孔隙水壓計配置圖(本研究繪製)

響。水壓計埋設於表土面下方7.5 cm，如圖10中B處。

本研究目標為探討不同安裝流量對負壓沉箱基礎抗拉拔承載力之影響，試驗規劃三組不同吸力進行沉箱模型安裝，安裝後之沉箱均施以定速垂直拉力。本研究經由多組安裝流量測試結果，選定安裝流量 $4.33 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $5.75 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $7.43 \text{ cm}^3/\text{s}$ 進行試驗，以此流量安裝模型時，砂箱邊壁處水壓無明顯變化。圖11為拉拔階段沉箱內部與邊壁處壓力計測得之水壓變化。沉箱受拉力作用時，沉箱內部產生劇烈之水壓變化(Δu)，而邊壁處之水壓(Δu_p)則無顯著變化。顯示本研究實驗沉箱尺寸及配置不會對沉箱內部之滲流流場造成影響。

Balachowski (2007)與Garnier *et al.* (2007)認為進行1-g模型試驗時，模型寬度與土壤中值粒徑之比值 B/D_{50} 大於50時，可忽略土壤粒徑效應對縮尺模型之影響。本研究之模型沉箱尺寸裙翼長 $H_m = 7.5 \text{ cm}$ ，模型內徑 $D_m = 10 \text{ cm}$ ，標準砂之 D_{50} 為 0.122 mm ，裙翼長與土壤粒徑之比值為614.75，因此，本研究採用之試驗砂土不會因粒徑造成試驗成果受模型尺寸效應影響。

4. 安裝吸力對沉箱基礎拉拔力之影響

4.1 負壓沉箱模型安裝臨界吸力與臨界流量

本研究於模型試驗時以抽水機改變沉箱安裝時之負壓。表2為本研究進行沉箱安裝之抽水條件與負壓反應， V 為沉箱開始安裝至沉箱完全沒入土壤時之抽水體積， T_i 為安裝時間， Q 為安裝流量， Δu_a 為安裝期間沉箱內部測得之平均負壓。由安裝階段量測結果可知，隨著安裝流量增加，沉箱內部負壓愈大，沉箱安裝時間亦隨之減少。

避免於安裝模型沉箱過程中發生滲流破壞，本研究將模型沉箱貫入深度、土壤有效單

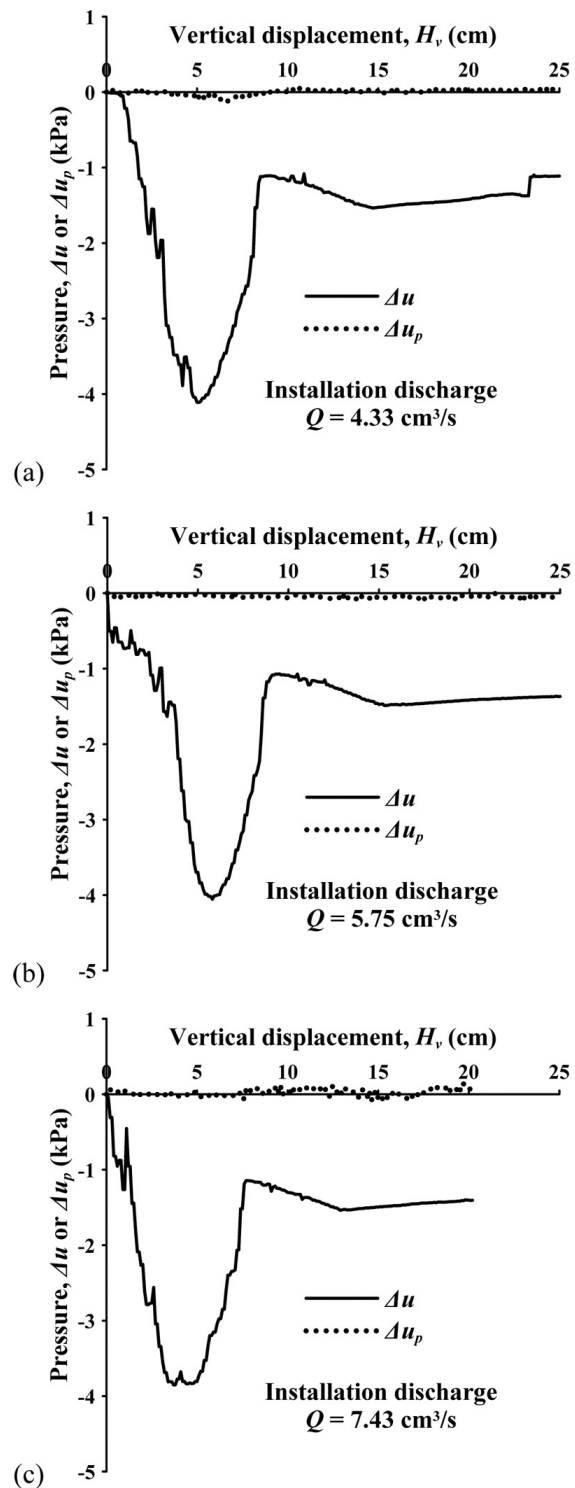


圖11 負壓沉箱模型受垂直拉力時沉箱內部壓力 Δu 與砂箱邊壁土體孔隙水壓 Δu_p 隨垂直位移 H_v 之變化：(a)安裝流量等於 $4.33 \text{ cm}^3/\text{s}$ (b)安裝流量等於 $5.75 \text{ cm}^3/\text{s}$ (c)安裝流量等於 $7.43 \text{ cm}^3/\text{s}$ (本研究繪製)

位重及沉箱長徑比等參數代入Guttormsen *et al.* (1999)、Feld (2001)、Sender & Randolph (2009)等學者提出之半經驗公式計算模型沉箱之臨界

表2 沉箱安裝階段抽水條件及負壓反應(本研究整理)

| 組別 | $V(\text{cm}^3)$ | $T_i(\text{s})$ | $Q(\text{cm}^3/\text{s})$ | $\Delta u_a(\text{kPa})$ |
|----|------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|
| 1 | 447 | 103.2 | 4.33 | -0.274 |
| 2 | 451 | 78.5 | 5.75 | -0.379 |
| 3 | 370 | 49.8 | 7.43 | -0.431 |

安裝吸力。

由圖5可知Senders & Randolph (2009)計算之臨界負壓值較為保守。本文依其方法計算本試驗配置之臨界吸力值為0.884 kPa，表2中各安裝條件下沉箱內部測得之負壓值均未超過此臨界值。為了取得負壓沉箱臨界安裝流量，將實測沉箱內部壓力與流量關係延伸至與Senders & Randolph (2009)方法計算之臨界負壓值(-0.884 kPa)，如圖12所示，以此點對應之流量作為模型沉箱之臨界安裝流量 Q_{crit} 。

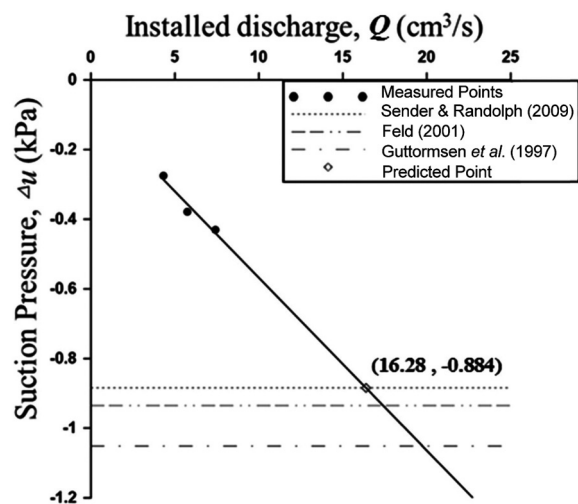
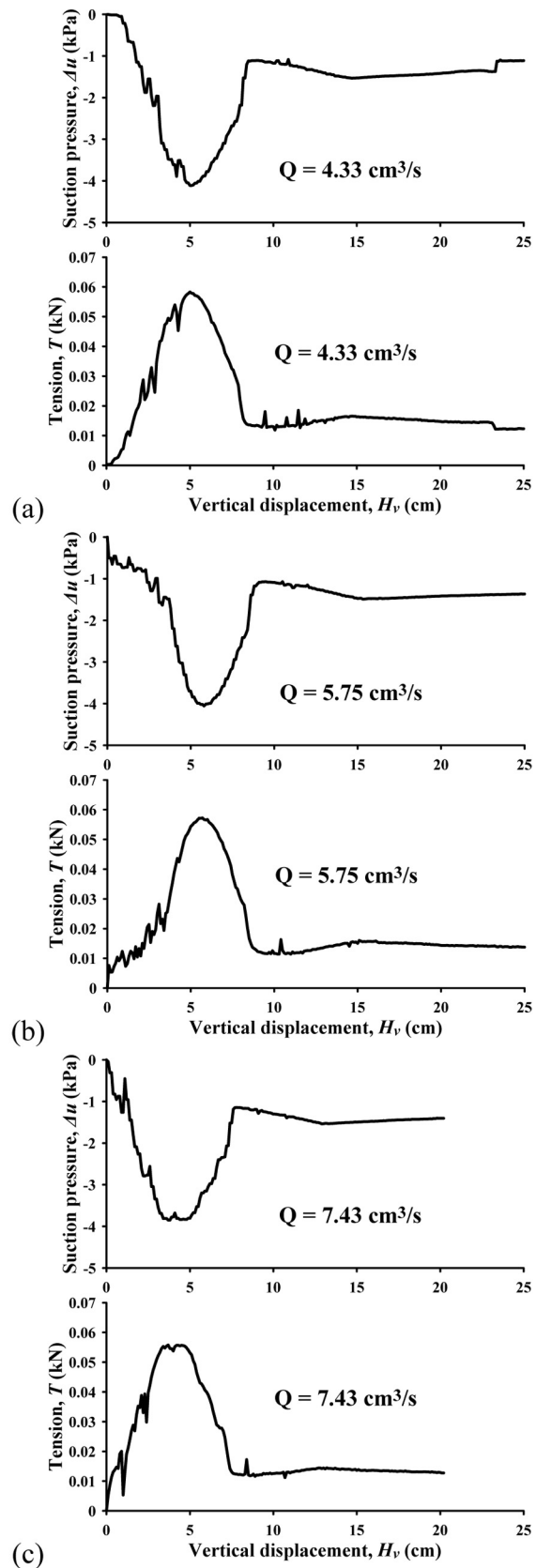


圖12 安裝流量與沉箱內部負壓關係及臨界安裝流量預測(本研究繪製)

4.2 安裝吸力對沉箱拉拔力之影響

本研究針對不同安裝流量下埋置之沉箱模型進行拉拔力分析。以10 mm/s之固定速率對沉箱模型施加垂直拉力，基礎承受拉拔過程中，抵抗垂直拉力之力量及基礎之極限拉拔力來源由邊壁兩側與土壤之摩擦力、沉箱內部負壓吸力以及沉箱自重提供。圖13為不同安裝流量下，沉箱受拉力過程中，沉箱內部壓力 Δu

圖13 負壓沉箱模型受拉拔作用時沉箱內部壓力 Δu 與拉拔力 T 隨垂直位移關係：(a)安裝流量等於 $4.33 \text{ cm}^3/\text{s}$ (b)安裝流量等於 $5.75 \text{ cm}^3/\text{s}$ (c)安裝流量等於 $7.43 \text{ cm}^3/\text{s}$ (本研究繪製)

與拉力 T 隨垂直位移 H_v 之變化。各組試驗結果顯示，沉箱基礎內部壓力於受拉初始階段隨沉箱垂直移動距離增加而使負壓增加，當負壓達一極值後快速下降，直到沉箱被完全拉出土面 ($H_v = 7.5$ cm)。當沉箱拉出土面後，垂直拉力為沉箱自重及沉箱內部土重之和(圖14)，沉箱內部吸力約維持定值，不隨沉箱垂直位移增加而變化。本試驗配置中，當沉箱安裝流量為 4.33 cm^3/s 時，極限拉拔力發生於垂直位移達 5.15 公分時，極限拉拔力為 0.0581 kN，沉箱內部最大負壓 Δu_u 為 -4.092 kPa。當沉箱之安裝流量為 5.75 cm^3/s 時，極限拉拔力發生於垂直位移達 5.77 公分時，極限拉拔力為 0.0571 kN，沉箱內部最大負壓為 -4.033 kPa。當沉箱之安裝流量為 7.43 cm^3/s 時，極限拉拔力於垂直位移 4.15 公分時，極限拉拔力為 0.0556 kN，沉箱內最大負壓為 -3.828 kPa。本試驗結果顯示當沉箱受拉之垂直位移達約 $2/3$ 倍裙翼長時，沉箱基礎可發揮極

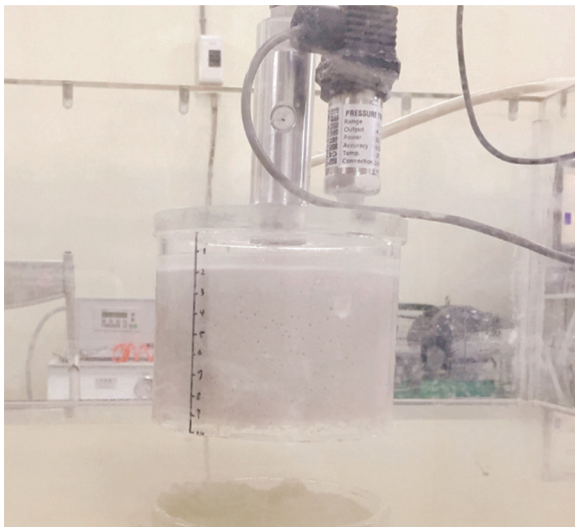


圖14 沉箱受拉拔後內部土塞現象(本研究繪製)

限拉拔力。各組試驗結果彙整於表3。

將各試驗測得之極限拉拔力 T_u 與沉箱內部最大負壓吸力 S_u 對沉箱安裝流量 Q 作圖如圖15所示。本試驗結果顯示沉箱基礎之極限拉拔力隨安裝流量增加而降低。沉箱安裝流量愈大，滲流對沉箱鄰近土壤造成之擾動愈顯著。沉箱壁體與砂土之摩擦力提供部分拉拔阻抗，以負壓安裝沉箱對邊壁土壤之擾動將降低沉箱摩擦阻抗，使其拉拔力隨安裝流量增加而降低。此外，沉箱受拉時，吸力約貢獻了55%之拉拔阻抗，且拉拔吸力阻抗亦隨安裝流量增加而降低。本研究結果說明負壓沉箱以低流量抽水進行安裝可提高沉箱基礎之極限拉拔力；而增加沉箱安裝抽水流量可縮短安裝時間，但將使沉箱基礎之極限拉拔力降低。

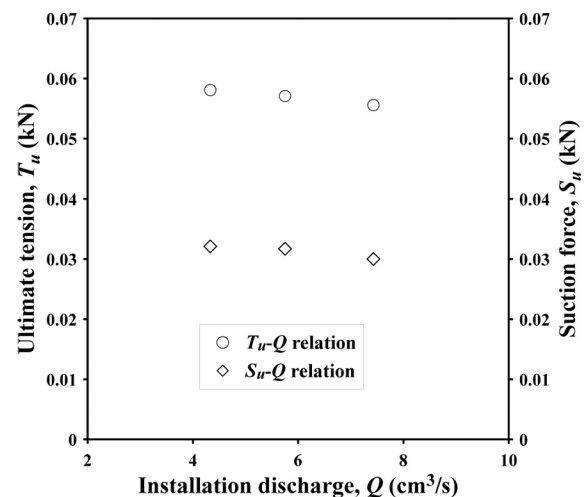


圖15 沉箱安裝流量 Q 對負壓沉箱極限拉拔力 T_u 與受拉時吸力反應 S_u 之影響(本研究繪製)

5. 結 論

本研究以室內砂箱模型試驗模擬負壓沉箱

表3 不同安裝流量對應之極限拉拔力與沉箱內最大負壓 (本研究整理)

| 組別 | Q (cm^3/s) | 達 T_u 時之沉箱垂直位移(cm) | 極限拉拔力 T_u (kN) | 沉箱內最大負壓 Δu_u (kPa) | 沉箱內最大負壓吸力 S_u (kN) ($S_u = -\Delta u_u \times \frac{\pi D^2}{4}$) |
|----|--------------------------------|----------------------|------------------|----------------------------|---|
| 1 | 4.33 | 5.15 | 0.0581 | -4.092 | 0.0321 |
| 2 | 5.75 | 5.77 | 0.0571 | -4.033 | 0.0317 |
| 3 | 7.43 | 4.15 | 0.0556 | -3.828 | 0.03 |

基礎安裝於中等緊密標準砂中受拉力作用之受力變形反應。參考現有負壓沉箱基礎實際案例之尺寸，給定模型沉箱長徑比 $H_m/D_m=0.75$ 。本試驗於不同安裝流量條件下，對負壓沉箱施予垂直拉力，量測負壓沉箱內部吸力與沉箱垂直位移反應，建立負壓沉箱基礎於不同安裝流量下之受力變形反應及吸力變化反應。試驗結果顯示，負壓沉箱之安裝流量愈大，引致之滲流可能對沉箱鄰近土壤造成較大之擾動，使沉箱裙翼之摩擦阻抗降低，造成沉箱極限拉力隨安裝流量增加而降低。當負壓沉箱受拉時，沉箱內部之吸力提供之吸力阻抗亦佔負壓沉箱極限拉拔力之55%，且吸力阻抗亦隨沉箱安裝流量增加而降低。本研究小尺寸負壓沉箱模型實驗結果顯示，沉箱模型之極限拉拔力與最大吸力阻抗均發生於負壓沉箱受拉時垂直位移達約2/3倍裙翼長時，後續可探討大尺寸沉箱及實體沉箱基礎之極限拉拔力與沉箱垂直位移之關係。

參考文獻

- 中能發電股份有限公司，2017，「中能離岸風力發電開發計畫環境影響說明書」。
- 台灣電力股份有限公司，2009a，「彰濱離岸風力發電計畫可行性研究」。
- 台灣電力股份有限公司，2009b，「離岸風力發電第一期計畫」。
- 海峽風電股份有限公司籌備處，2017a，「海峽離岸風力發電計畫(27號風場)環境影響說明書」。
- 海峽風電股份有限公司籌備處，2017b，「海峽離岸風力發電計畫(28號風場)環境影響說明書」。
- 臺灣海洋科技研究中心，2012，「彰濱海墘地質鑽探試驗分析工作報告書」。
- Andersen, K. H., J. D. Murff, M. F. Randolph, E. C. Clukey, C. T. Erbrich, H. P. Jostad, B. Hansen, C. Aubeny, P. Sharma and C. Supachawarote, 2005. Suction anchors for deepwater applications. International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, ISFOG, Perth, pp. 3-30.
- Balachowski, L. 2007. Size effect in centrifuge cone penetration tests. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, Vol. 54(3), pp. 161-181.
- Colliat, J. L., P. Boisard, K. Andersen and K. Schroeder, 1995. Caisson foundations as alternative anchors for permanent mooring of a process barge offshore Congo. Proc. 27th Offshore Technology Conf. OTC. Houston, pp. 919-929.
- Colliat, J. L., P. Boisard, J. C. Gramet and P. Sparrevik, 1996. Design and installation of suction anchor piles at a soft clay site in the Gulf of Guinea. Proc. 28th Offshore Technology Conf, OTC, Houston, pp. 325-337.
- Colliat, J. L., P. Boisard, J. C. Gramet and P. Sparrevik, 1997. Geotechnical design and installation behaviour of suction anchor piles. Comparison with drag anchors. Proc. 7th Int. Conf on Behaviour of Offshore Struct. Pergamon, Delft, The Netherlands, pp. 133-147.
- Colliat, J. L. and L. Foulhoux, 1998. Suction piles versus drag anchors for deep water moorings. Proc., 8th Int. Conf on Offshore and Polar Eng. Montreal, Canada, pp. 225-232.
- Feld, T., 2001. Suction Buckets: a new innovation foundation concept, applied to offshore wind turbines. Doctoral dissertation, Aalborg Universitetsforlag.
- Garnier, J., C. Gaudin, S. M. Springman, P. J. Culligan, D. Goodings, D. Konig, B. Kutter, R. Phillips, M.F. Randolph and L. Thorel, 2007. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge

- modelling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 7(3), pp. 1-23.
- Guo, Z., L. Wang, F. Yuan, and L. Li, 2012. Model tests on installation techniques of suction caissons in a soft clay seabed. *Applied Ocean Research*, Vol. 34, pp. 116-125.
- Guttormsen, T., T. Eklund and P. Sparrevik, 1999. Installation and retrieval of suction anchors. *Publikasjon-Norges Geotekniske Institutt*, Vol. 204, pp. 1-21.
- Houlsby, G. T., R. B. Kelly and B. W. Byrne, 2005. The tensile capacity of suction caissons in sand under rapid loading. In *Proceedings of the international symposium on frontiers in offshore geomechanics*, Perth, pp. 405-410.
- Ibsen, L. B. and R. Brincker, 2004. Design of a new foundation for offshore wind turbines. *Proceedings of the 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC)*, Detroit, Michigan.
- Lian, J., F. Chen and H. Wang, 2014. Laboratory tests on soil-skirt interaction and penetration resistance of suction caissons during installation in sand. *Ocean Engineering*, Vol. 84, pp. 1-13.
- Olson, R. E., A. F. Rauch, A. M. Luke, D. R. Maniar, J. L. Tassoulas and E. C. Meham, 2003. Soil reconsolidation following the installation of suction caissons. *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Offshore Technology Conference, pp. 1-9.
- Ørsted company, 2014. <https://orsted.com/en/About-us>.
- Peck, R. B., W. E. Hanson and T. H. Thornburn, 1953. *Foundation engineering*. Wiley: New York, United States.
- Senders, M. and M. F. Randolph, 2009. CPT-based method for the installation of suction caissons in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135(1), pp. 14-25.
- Senpere, D. and G. A. Auvergne, 1982. Suction anchor piles-a proven alternative to driving or drilling. *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- Tran, M. N., M. F. Randolph and D. W. Airey, 2004. Experimental study of suction installation of caissons in dense sand. In: *ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, pp. 105-112.
- Villalobos, F. 2007. Installation of suction caissons in sand. *Proceedings of the Proc., 6th Chilean Conf. of Geotechnics (Congreso Chileno de Geotecnia)*.

Effect of Installation Discharge on the Pullout Capacity of the Suction Bucket Foundation

Yu-Shu Kuo^{1*} Chi-Sheng Lin² Chieh-You Yang³
Wei-Ting Chen⁴ Chia-Wei Hsu⁵

ABSTRACT

It is important to verify the pullout capacity of multi-pile foundation for offshore wind turbine supporting structures. The friction between pile surface and soil provides the resistance for pile under vertical load. For the offshore wind turbines with multi-leg foundations in deep water region, suction bucket is an alternative choice for foundation. In this study, 1-g model tests are used to simulate the installation process of the suction bucket. After the installation of the suction bucket, a vertical tension load is applied to the suction bucket. The suction pressure in the bucket and the vertical displacement of the bucket are recorded, and the correlation between them is presented. The suction pressure in the bucket increases with the vertical deformation in the beginning when the bucket is subjected to tension and the suction pressure decreases when the deformation is large enough. Under this small scale model test condition, the pullout capacity of the suction bucket is mobilized when the vertical displacement of the bucket reaches 2/3 length of the skirt. The pullout capacity and the suction pressure decreases with the increase of the installation discharge.

Keywords: suction bucket, offshore wind energy, pullout capacity.

¹ Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University.

² PhD. candidate, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University.

³ Engineer, Jui-Tai Engineering Consultant Company.

⁴ Graduated student, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University.

⁵ Undergraduate student, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University.

*Corresponding Author, E-mail: kuoyushu@mail.ncku.edu.tw

Received Date: February 14, 2019

Revised Date: June 6, 2019

Accepted Date: July 2, 2019