

國立交通大學  
土木工程學系  
碩士論文

自升式風機安裝船支撐腳承載力  
模型試驗

Model Tests to Estimate Bearing Capacity of a  
Spudcan under Jack-up Turbine Installation  
Vessel

研究生：李承祐

指導教授：方永壽 博士

中華民國一〇二年九月

自升式風機安裝船支撐腳承載力  
模型試驗

**Model Tests to Estimate Bearing Capacity  
of a Spudcan under Jack-up Turbine  
Installation Vessel**

研究生：李承祐      Student：Cheng-You Li  
指導教授：方永壽 博士      Advisor：Dr. Yung-Show Fang

國立交通大學  
土木工程學系  
碩士論文

A Thesis

Submitted to the Department of Civil Engineering  
College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of  
Master of Engineering

in

Civil Engineering

September 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年九月

# 自升式風機安裝船支撐腳承載力

## 模型試驗

研究生：李承祐

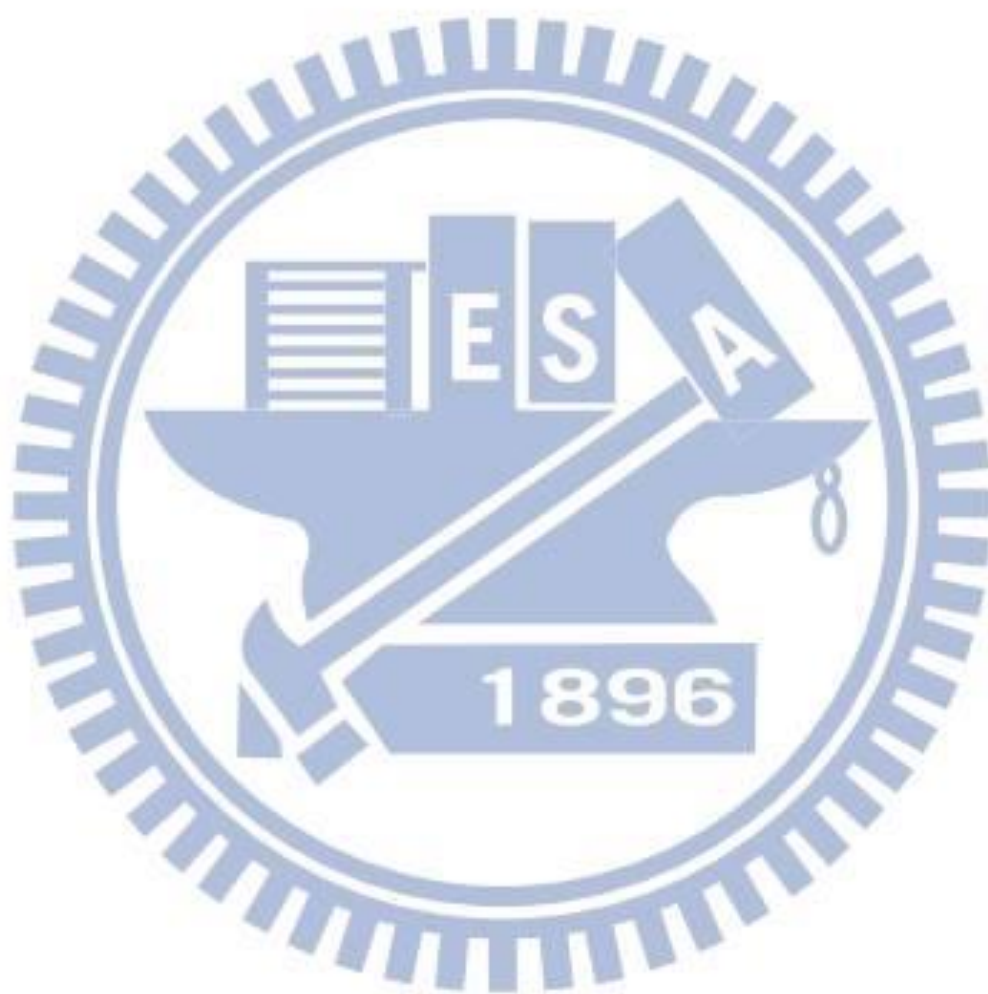
指導教授：方永壽 博士

國立交通大學土木工程學系

### 摘要

本研究以實驗方法探討自升式風機安裝船支撐基腳(spudcan)承受垂直荷重，在飽和疏鬆砂土造成之破壞機制。交通大學支撐基腳模型試驗設備包含以下5個部分：(1)反力架；(2)試驗土槽；(3)支撐基腳；(4)垂直荷重加載系統；及(5)資料擷取系統。台灣電力公司對彰化離岸風力發電區進行地質鑽探及現場試驗，得到彰化離岸風力計畫區海床表面至12 m 深度砂土之 SPT-N 值大約介於 7 ~ 21 之間，其相對密度介於  $D_r = 15 \sim 46\%$ 。本研究採用水中實降法在水中製作均勻砂土試體，並以篩網開口大小、及砂土沉降落距控制試驗土樣之相對密度，模擬台灣西部沿海沖積土壤於海水中緩慢沉澱形成之土層。實驗結果顯示，以水中實降法備製砂土試體，不論砂土顆粒通過 10 號或 20 號篩網，砂土試體之相對密度，皆隨砂土在水中沉降落距之增加而加大。若欲形成相對密度為 15 ~ 46% 之試體，可以優先使用 200 mm 之沉降落距與 10 號篩網。Vesic (1973)說明當土壤相對密度小於 35%，土壤受到荷重加載發生 punching shear failure，此種情況下土壤的破壞面不會延伸到地表面，比較實驗結果，以水中沉降法備製之砂土試體，平均相對密度為 23.2%，spudcan 貫入土層 100 mm 時，spudcan 下方砂土產生位移，但破壞面並無發展到表面，符合 Vesic(1973) punching shear failure。根據 Vesic (1963)相對密度與載重關係圖，依據圖中之關係可以得到極限承載力為  $q_u = 71.6 \text{ kN/m}^2$ ， $Q_u = 2.53 \text{ kN}$ 。當極限承載力  $Q_u$  為 2.53 kN 時，所對應之沉陷量為  $30 + 42 = 72 \text{ mm}$ ，與實驗結果相比，當沉陷量為 100 mm 時，所對應之荷重為 2.57 kN 與依 Vesic(1963)求出之極限承載力  $Q_u = 2.53 \text{ kN}$  相近。

關鍵詞：承載力、破壞機制、模型試驗、貫穿、相對密度、支撐基腳、自升式安裝船、水中實降法。



# Model Tests to Estimate Bearing Capacity of a Spudcan under Jack-up Turbine Installation Vessel

Student : Cheng-You Lee

Advisor : Dr. Yung-Show Fang

Department of Civil Engineering

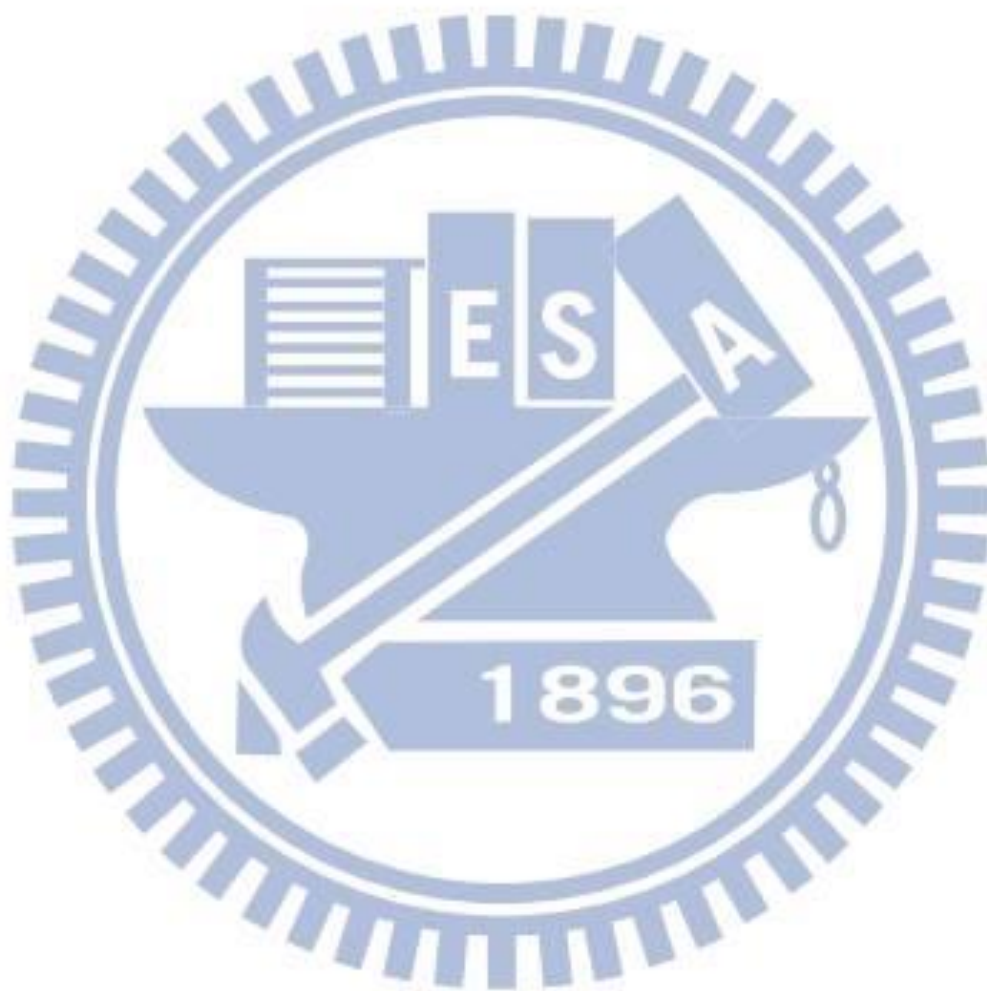
National Chiao Tung University

## Abstract

In this thesis investigated the mechanism of failure from the bearing capacity of a spudcan under Jack-up turbine installation vessel in saturated loose sand. The spudcan experiment system at the National Chiao Tung University consists of the following parts: (1) reaction frame; (2) soil bin; (3) model spudcan; (4) vertical loading system; and (5) data acquisition. According to the results of the situ tests and the geo-drillings at Changhua offshore wind power distinct from Taiwan Power Company. Knowing the SPT-N of sand from seabed to depth 12 m is between 7 and 21 in Changhua offshore wind power project distinct, and the relative density of the sand is between 15 to 46%. To achieve a uniform soil specimen, the water-pluviation method was adopted. The relative density of Ottawa sand was controlled by the sieve opening and the drop distance between the sieve and the density cup. Preliminary test results indicated that, whether using sieve No. 10 or No. 20, the relative density of the specimen increases with increasing drop distance of soil particles in water. To achieve the relative density (15 to 46%) of the seabed soil density on the west coast of Taiwan, the drop distance of 200 mm and the sieve No. 10 are recommended. Vesic (1973) said that the soil got overload and the soil would happen punching shear failure when the relative density was below 35%. The failure surface would not to extend ground surface. In test, make the sand specimens by water-pluviation method, we got the average relative density was 23.2%. Penetrating spudcan to the sand layer to depth 100 mm, the sand under the spudcan would have displacement but the failure surface would not to extend to ground surface. The test result coincided the research of Vesic (1973). According to the figure of relative-load of Vesic(1963). Getting ultimate capacity was  $q_u=71.6 \text{ kN/m}^2$ ,  $Q_u=2.53 \text{ kN}$ . When the ultimate capacity was 2.53 kN that the corresponding settlement was  $30+42=72 \text{ mm}$ . Comparing the test results and Vesic's researching, when the settlement approach to 100 mm, the

corresponding loading was 2.57 kN which was near to ultimate capacity  $Q_u=2.53$  kN from Vesic (1963).

Keywords: bearing capacity, failure mechanism, model test, punch through, relative density, spudcan, turbine installation vessel, water- pluviation method



## 誌謝

在交通大學兩年的研究生生活，承蒙吾師方永壽教授的悉心指導，使學生在研究思考，及做人處世上獲益匪淺，並得以順利完成本論文，在此致上誠摯的敬意。在學期間感謝潘以文教授、廖志中教授、林志平教授、黃安斌教授、單信瑜教授於課業上的指導。口試期間感謝國立中央大學李崇正教授與及國立高雄第一科技大學范嘉程教授的意見與指導。

本研究得以順利進行，需感謝船舶暨海洋產業研發中心的吳兆呈委員及常欣玉學長所提供寶貴的資料及意見，以及在設計與建造儀器方面都給予相當多協助的李國華老闆，在此一併感謝。

兩年的研究生生活，讓我體驗到與大學生活完全不同的形態，是一種新鮮的體驗，感謝，研究期間，感謝同門的易昌，湘銘，在最後關頭還可以互相打氣，打打FS，一起通過難關，實驗期間感謝各位學弟，承劭、慶祐、同心，阿信、小繼，感謝你們勞心勞力的幫忙，祝福以上各位都會有美好前程，再次感謝。

最後感謝一路栽培我，保護我的父親及母親，以及從小到大總是鼓勵我、支持我的大阿姨及三阿姨感謝你們拉拔我長大，希望我可以盡早有力量回報你們的恩情，願將這份榮耀及喜悅分享給我的家人及我的朋友。

# 目錄

摘要.....	i
誌謝.....	v
表目錄.....	viii
圖目錄.....	ix
符號說明.....	xiv
第一章緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機與目的.....	2
1.3 研究方法.....	3
1.4 論文組織.....	3
第二章文獻回顧.....	5
2.1 能源問題.....	5
2.1.1 再生能源.....	6
2.2 風力發電.....	7
2.2.1 台灣風場特性.....	7
2.2.2 離岸風機的基礎.....	8
2.3 自升式安裝船.....	8
2.3.1 風機基礎及風機之安裝.....	9
2.4 支撐基腳破壞模式.....	10
2.4.1 Spudcan 破壞案例.....	10
2.5 淺基礎造成土壤破壞模式.....	10
2.6 基腳支承力理論.....	11
2.6.1 Terzaghi 淺基礎支承力理論.....	11
2.6.2 SNAME 基腳支承力設計規範.....	12
2.7 Spudcan 行為之離心機模型試驗.....	12
2.7.1 NUS 離心機模型試驗.....	12
2.7.2 UWA 離心機模型試驗.....	13
2.8 Spudcan 行為之數值模擬.....	14
第三章支撐基腳模型試驗之儀器設計與建造.....	15
3.1 反力架.....	15
3.2 試驗土槽之設計.....	16
3.2.1 NUS 試驗土槽.....	16
3.2.2 NCTU 試驗土槽之設計.....	16
3.2.3 水中賈降土壤之篩網設計.....	17
3.3. 支撐基腳之設計.....	18



3.3.1 UWA 及 NUS 之 Spudcan 模型介紹.....	18
3.3.2 NCTU spudcan 設計.....	18
3.4 垂直荷重加載設備.....	19
3.4.1 機械式馬達齒輪箱.....	19
3.4.2 馬達齒輪箱控制器.....	19
3.4.3 荷重計.....	19
3.4.4 電位式位移計.....	20
3.5 資料擷取系統.....	20
第四章 備製疏鬆飽和砂土試體.....	21
4.1 台灣西部沿海海床土壤特性.....	21
4.1.1 地質調查結果.....	22
4.2 備製飽和疏鬆砂土試體.....	23
4.2.1 試驗土壤.....	23
4.2.2 水中砂土之相對密度.....	23
4.3 水中實降法與砂土密度控制.....	24
4.4 砂土密度試驗結果.....	25
第五章 Spudcan 模型初步試驗結果.....	26
5.1 試體除氣試驗.....	26
5.2 壓克力視窗標示與潤滑層.....	27
5.2.1 壓克力視窗標示.....	27
5.2.2 潤滑層.....	27
5.3 備製疏鬆砂土試體.....	27
5.3.1 砂土密度控制試驗.....	27
5.3.2 砂土密度控制試驗結果.....	28
5.4 Spudcan 垂直加載試驗結果.....	28
5.4.1 土壤位移與破壞模式.....	28
5.4.2 Spudcan 載重與沉陷關係.....	29
第六章 結論.....	31
參考文獻.....	32

## 表目錄

表 2-1 重力式、單樁式、三腳式離岸風機基礎優缺點(摘自呂威賢 2012).....	35
表 3-1 UWA 及 NUS spudcan 試驗模型尺寸及角度表 .....	36
表 4-1 彰化風力發電計畫區海床土壤室內試驗成果表(資料摘自台灣電力公 2009)...	37
表 4-2 標準貫入試驗 N 值與砂土相對密度及內摩擦角之經驗關係(摘自 Das 2010) .	37
表 4-3 彰化離岸風力計畫區鑽孔深度與其 SPT-N 值(資料摘自台灣電力公司 2009)	38



# 圖目錄

圖 1-1 2012 歐洲地區離岸風能發電裝置量比例(摘自陳芙靜 2012).....	39
圖 1-2 自升式安裝平台船安裝離岸風機.....	40
圖 1-3 鑽油平台及扁平圓錐狀 spudcan.....	41
圖 1-4 鑽油平台支撐腳發生貫穿式破壞.....	42
圖 2-1 我國 2010 年初級能源供給及自產能源比例 (摘自經濟部能源局, 能源統計手冊 2011) .....	43
圖 2-2 比利時海岸的北海 5MW 離岸風機.....	43
圖 2-3 台灣風場調查(摘自工業技術研究院 2007).....	44
圖 2-4 不同深度海床的風機基礎型式(摘自 NREL National Renewable Energy Laboratory 2010) .....	45
圖 2-5 自升式平台船安裝離岸風機.....	45
圖 2-6 自升式安裝船支撐腳收縮至船身上方.....	46
圖 2-7 自升式鑽油平台及 spudcan.....	47
圖 2-8 基礎沖刷防護層級配料鋪設及基礎吊裝(摘自呂威賢 2012).....	48
圖 2-9 基樁定位及安裝與標轉換段安裝(摘自呂威賢 2012).....	48
圖 2-10 基礎沖刷防護塊石鋪設及安裝工作台(摘自呂威賢 2012).....	49
圖 2-11 風力機岸上整備及裝船整備(摘自呂威賢 2012).....	49
圖 2-12 風力機塔架上下段安裝(摘自呂威賢 2012).....	50
圖 2-13 風力機葉片吊裝(摘自呂威賢 2012).....	51
圖 2-14 鑽油平台之支撐基腳.....	52
圖 2-15 Spudcan 破壞模式統計(摘自 Health & Safety Execution 2009 ).....	52
圖 2-16 不同砂土密度造成之淺基礎支承力破壞(摘自 Vesic 1973).....	53
圖 2-17 貫穿式淺基礎破壞(摘自 Vesic 1973).....	53

圖 2-18 砂土上淺基礎因垂直載重造成的破壞模式(摘自 Vesic 1973).....	53
圖 2-19 條型基腳下的土壤支承力破壞模式(摘自 Terzaghi 1943).....	54
圖 2-20 基腳支承力分析(摘自 SNAME 2008).....	54
圖 2-21 NUS 離心機設備(摘自 Lu 2007).....	55
圖 2-22 NUS 離心機試驗結果(摘自 Lu 2007).....	56
圖 2-23 UWA 離心機試驗結果(摘自 Hossain et al. 2010).....	57
圖 2-24 數值模擬結果(摘自 Qiu and Henke 2011).....	58
圖 3-1 交通大學基礎模型試驗室平面配置.....	59
圖 3-2(a) 試驗土槽及 spudcan 垂直加載系統前視圖.....	60
圖 3-2(b) 反力架施工圖.....	61
圖 3-2(c) 試驗土槽前視圖.....	62
圖 3-2(d) 位移計安裝位置.....	63
圖 3-3(a) 試驗土槽及 spudcan 垂直加載系統側視圖.....	64
圖 3-3(b) 試驗土槽及 spudcan 垂直加載系統側視圖.....	65
圖 3-4 試驗土槽及 spudcan 反力架頂視圖.....	66
圖 3-5 NUS 試驗土槽前視圖.....	67
圖 3-6 NUS 試驗土槽及 spudcan.....	67
圖 3-7 NUS 試驗土槽頂視圖.....	68
圖 3-8 以水中沉降法製作土壤試體之長方形篩網.....	69
圖 3-9 spudcan 各部位尺寸及角度定義.....	70
圖 3-10 NUS spudcan 模型(摘自 Lu 2007).....	71
圖 3-11 UWA spudcan 模型(摘自 Hossain and Randolph 2006).....	71
圖 3-12 NCTU half-spudcan 模型.....	72
圖 3-13 垂直荷重加載系統.....	73
圖 3-14 機械式馬達齒輪箱.....	74
圖 3-15 馬達齒輪箱控制器.....	75

圖 3-16 20kN 壓拉兩用荷重計(Kyowa LUX-B-20kN-ID).....	75
圖 3-17 電位式位移計(Kyowa DTP-D-1ks).....	76
圖 3-18 資料擷取系統.....	77
圖 3-19 動態應變放大器(Kyowa DPM-711B).....	78
圖 4-1 彰化離岸風力風場位置圖(摘自中央地調所 2000).....	79
圖 4-2 台灣地區陸地及海底地形圖(摘自國家海洋科學研究中心 1990)	80
圖 4-3 台灣地體構造資料圖(摘自中央地調所 2000).....	81
圖 4-4 彰化離岸風力發電計畫區鑽孔位置(摘自台灣電力公司 2009)....	82
圖 4-5 彰化離岸風力發電計畫區鑽孔剖面圖(摘自台灣電力公司 2009)	83
圖 4-6 彰化離岸風力發電計畫區鑽孔剖面圖(摘自台灣電力公司 2009)	84
圖 4-7 深度與 SPT-N 值分布圖(摘自台灣電力公司 2009).....	85
圖 4-8 渥太華砂之粒徑分布曲線(摘自 Chen 2003).....	86
圖 4-9 Spudcan 周圍土壤之破壞面(假設 spudcan 沉陷量為 1D).....	87
圖 4-10 浸泡渥太華砂.....	88
圖 4-11 桶徑 550 mm 之大試驗桶.....	89
圖 4-12 桶徑 355 mm 之小試驗桶.....	89
圖 4-13 將底層砂土置入桶徑 355 mm 小試驗桶.....	90
圖 4-14 砂土密度控制盒.....	91
圖 4-15 砂土密度盒置入 355 mm 小試驗桶.....	91
圖 4-16 (a) 密度盒在試驗桶內之擺放位置 (b) 水中實降法.....	92
圖 4-17 砂土經 PVC 管滑入篩網.....	93
圖 4-18 水中將落入控制盒之砂土刮平.....	94
圖 4-19 將濕砂放入烘箱內烘乾.....	95
圖 4-20(a) 使用 10 號篩網及落距 100 mm 實降之砂土相對密度分布.....	96
圖 4-20(b) 使用 10 號篩網及落距 200 mm 實降之砂土相對密度分布.....	97

圖 4-20(c) 使用 10 號篩網及落距 300 mm 實降之砂土相對密度分布.....	98
圖 4-21(a) 使用 20 號篩網及落距 100 mm 實降之砂土相對密度分布.....	99
圖 4-21(b) 使用 20 號篩網及落距 200 mm 實降之砂土相對密度分布...	100
圖 4-21(c) 使用 20 號篩網及落距 300 mm 實降之砂土相對密度分布...	101
圖 4-22 水中沉降落距與砂土相對密度關係圖.....	102
圖 5-1 真空幫浦.....	103
圖 5-2(a) 土槽上方放置氣密橡膠條.....	103
圖 5-2(b) 橡膠條上塗抹凡士林.....	104
圖 5-3 試驗土槽上方之蓋板及夾具與壓力表.....	105
圖 5-4 以真空幫浦進行試體除氣.....	105
圖 5-5 試體除氣試驗壓力與時間關係.....	106
圖 5-6 壓克力視窗外側黏貼紅色固定點.....	107
圖 5-7(a) 塑膠膜上黏貼藍色圓點.....	108
圖 5-7(b) 藍色圓點與紅色圓點的相對位置.....	108
圖 5-8 矽油 (Shin-Etsu KS-64).....	109
圖 5-9 塑膠膜.....	109
圖 5-10 將潤滑劑塗抹於壓克力板內側.....	110
圖 5-11 將潤滑膜鋪設於壓克力牆內側.....	111
圖 5-12 砂土填入土槽至 600 mm 形成土壤底層.....	112
圖 5-13 密度盒擺放位置前視圖.....	113
圖 5-14 密度盒擺放位置俯視圖.....	114
圖 5-15(a) 水中實降法示意圖.....	115
圖 5-15(b) 水中實降法示意圖.....	116
圖 5-16(a) 長方形篩網進行水中實降法.....	116
圖 5-16(b) 密度盒在水中刮平圖.....	117
圖 5-17 水中實降法試驗結果.....	118

圖 5-18 spudcan 貫入前備製至 900 mm 之飽和土層.....	119
圖 5-19 spudcan 貫入前起始點.....	120
圖 5-20(a) spudcan 貫入達 30 mm.....	121
圖 5-20(b) spudcan 貫入達 50 mm.....	121
圖 5-21 spudcan 貫入達 100 mm.....	122
圖 5-22(a) 相對密度與荷重(Vesic,1963).....	122
圖 5-22(b) spudcan 貫入達 100 mm 與 Lu (2007)之破壞模式做比較.....	122
圖 5-23 spudcan 貫入達 150 mm.....	123
圖 5-24(a) spudcan 貫入達 250 mm.....	124
圖 5-24(b) spudcan 貫入達 250 mm 與 Lu (2007)之破壞模式做比較.....	124
圖 5-25 相對密度與沉陷量關係(Vesic 1963).....	125
圖 5-26 Spudcan 載重與沉陷關係.....	126
圖 5-27 Spudcan 下側盤體接觸土壤.....	126
圖 5-28 貫入深度與沉陷關係.....	127

## 符號說明

$B^*$ : 淺基礎寬度

$C_u$ : 均勻係數

$c$ : 土壤凝聚力

$D$ : 支撐基腳直徑

$D_f$ : 基腳貫入深度

$D_{leg}$ : 支撐腳直徑

$D_r$ : 相對密度

$D_{sc}$ : spudcan 直徑

$d_q$ : 承载力深度因數

$d_\gamma$ : 承载力深度因數

$e_{max}$ : 最大孔隙比

$e_{min}$ : 最小孔隙比

$F_v$ : 垂直極限承载力

$H$ : 上層黏土厚度

$H_c$ : 錐尖高

$N$ : 標準貫入試驗值

$N_c$ 、 $N_q$ 、 $N_\gamma$ : 土壤支承係數

$po'$ : 有效覆土壓力

$Q_v$ : 垂直載重

$q$ : 載重

$q_u$ : 極限支承力

$S$ : 貫穿基腳的沉陷量

$S_u$ : 不排水剪力強度





$s_q$ 、 $s_\gamma$ :形狀因數

$T_d$ : spudcan 中層厚度

$\alpha$ :破壞面與水平面夾角

$\sigma$ :正應力

$\phi$ :內摩擦角

$\theta_c$ :為錐尖角度

$\theta_{ui}$ :spudcan 上側與水平線夾角

$\theta_{li}$ :spudcan 下側與水平線之夾角



# 第一章

## 緒論

### 1.1 前言

台灣是一個海島，地質年代較年輕，土地有限且缺乏自主能源，根據 2010 年經濟部能源局統計，台灣 99.57% 的能源都是靠進口，只有 0.43% 是自行生產。自從日本福島核能電廠災變後，核能安全受到強烈質疑，因而替代能源成為各國政府都非常注重的發展方向。

台灣四面環海，因此離岸風能（offshore wind energy）成為台灣替代能源的重要發展方向。根據世界風能協會（World Wind Energy Association, WWEA）統計資料(2011)顯示，2010 年全球離岸風力發電新增裝置容量為 1,161.7 MW，累計裝置容量達到 3.1 GW，年增容量較 2009 年達 59.4%，預計未來 10 年仍將大幅成長。圖 1-1(a)顯示英國 2011 年新增發電容量較前一年(2010 年)增加 854.2 MW，比利時、德國、丹麥在 2011 年也逐漸提高離岸風能的比例。圖 1-1(b)為 2012 歐洲各國的離岸風能累計裝置量排名，其中排名第一的英國總發電量為 2947.9 MW，佔歐洲離岸風力發電 57.8%。

朱正男(2012)指出，我國政府為加速再生能源開發、打造綠色能源經濟，提出「陽光屋頂百萬座，千架海陸風力機」的政策，正規劃將風能開發由陸域逐步延伸至離岸，預定在 2030 年前設置千架風力機，總裝置容

量將達 4,200 MW。

相較於陸地風機，離岸風機有著低震動，低噪音，減少土地徵收帶來的抗爭等優點，且海上風速較陸地上高而穩定，故海上風機的發電效率較陸上風機為佳，可以充分發揮其經濟效益，縮短回收期。若台灣在未來致力發展離岸風力發電，勢必逐年提升本土化風機建造及安裝能力，在現有基礎上，培養自行設計及建造自升式風機安裝船(jack-up turbine installation vessel)之能力。因此自升式安裝船附屬之支撐腳(leg)及基腳(spudcan)貫入海床砂土、黏土及軟硬互層土壤之承載力(bearing capacity)及破壞機制(failure mechanism)，成為必須進一步研究之課題。

## 1.2 研究動機與目的

當離岸風機基礎於海中建設完成後，需要自升式安裝船如(圖 1-2)搬運葉片(blade)、主發電機(primary generator)及塔架(tower)至風機基礎旁，安裝船伸出支撐基腳至海床，以自升式系統頂升船身至預定地高度後，進行安裝風機工作。支撐腳下方的基腳稱為 spudcan，如圖 1-3 所示，支撐基腳的形狀多為扁平圓錐形。若支撐基腳遭遇軟弱之海床土壤，例如極為疏鬆之砂土或黏土，無法支承平台船附屬設備之荷重，支撐基腳可能發生貫穿式(punch through)破壞，支撐腳快速沉入海床，引致工作平台的傾斜、損害其整體穩定性、並喪失其功能，如圖 1-4 所示。

英國健康安全局 (Health & Safety Executive 2009) 統計，約三分之一的自升式平台船發生事故的起因，多源自於基礎的問題，其中貫穿式破壞佔了 53% 的比例，對於離岸風力發電採用的自升式安裝船而言，軟弱海床

上的支撐腳承載力評估，是一個極需研究的課題。本研究期望經由模型試驗，充分了解 spudcan 貫入海床土壤的承載力，及支撐基腳破壞的發展機制，做為未來台灣自行設計與建造自升式安裝船、其支撐腳及 spudcan 之參考。

### 1.3 研究方法

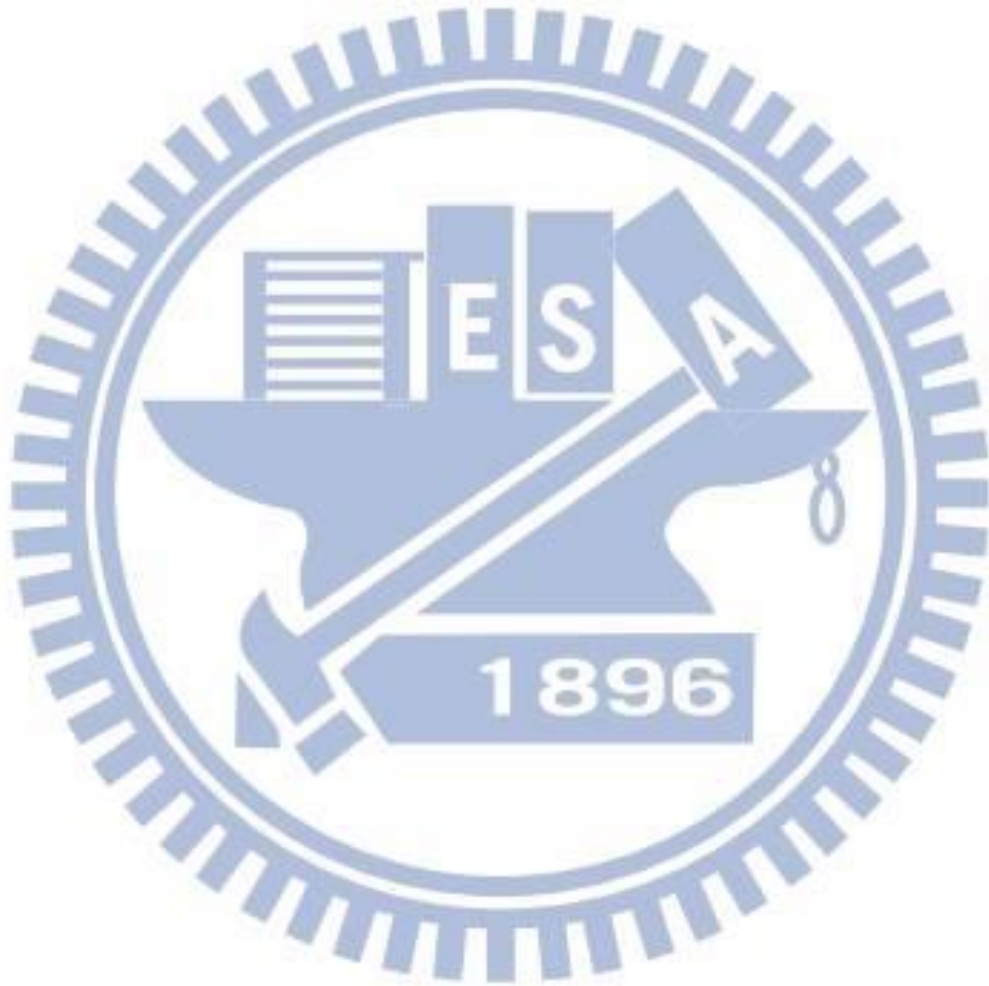
探討 spudcan 貫入海底土壤之承載力及其破壞模式，可採用理論方法、數值模擬方法、及模型試驗進行研究。本研究將採用模型實驗方法，在交通大學基礎模型試驗室自行設計建造反力架、試驗土槽、支撐基腳、垂直加載系統、及資料擷取系統。為模擬台灣西部沿海疏鬆土壤，本研究將採用水中質降法(water pluviation)備製均勻土壤試體、並以質降篩網開口大小及水中沉降落距控制砂土密度。本研究將砂土試體浸水並以 suction pump 抽除土壤孔隙之空氣，模擬海床飽和土壤行為。

試體製作完成後，以機械式馬達齒輪箱施加垂直力，將模型 spudcan 貫入土槽內飽和疏鬆之土壤，探討支撐基腳貫入土壤之承載力及土層破壞機制。實驗過程以荷重計(load cell)量測垂直載重，以電位式位移計(potentiometer-type displacement transducer)量測 spudcan 的垂直位移，並以資料擷取系統收集、儲存及分析獲得的測試資料。

### 1.4 論文組織

本論文共分六章，第一章為前言，第二章為文獻回顧，第三章為支撐基腳模型試驗之儀器設計與建造。第四章介紹台灣西部濱海地區海床土

壤之特性、及如何在實驗室備製飽和疏鬆砂土試體。第五章為 spudcan 模型初步實驗成果。第六章為結論。



## 第二章

### 文獻回顧

Bloomberg New Energy Finance (2010)報告指出，2010 年全球投入再生能源 (renewable energy)的金額為 2,430 億美元，而其中風力發電的投資金額達 900 億美元，所佔的比例達 37%，顯示世界各國均已將風力發電視為主要的再生能源發展標的。隨著全球的陸域風力發電逐漸飽和，離岸風場自然成為各國的重要發展目標，並期望藉其帶動本土產業發展，進而促進經濟成長。

本章從能源的觀點出發，敘述當前的能源危機問題，並探討再生能源中的離岸風力發電。對風力發電、台灣風場的特性、離岸風機的基礎、自升式安裝船，支撐基腳破壞模式、淺基礎極限支承力理論、支撐基腳行為之離心機模型試驗及支撐基腳之數值模擬等相關文獻探討。

#### 2.1 能源問題

工研院綠能與環境研究所楊昌中(2012)於「能源危機與永續發展」報告中提到，全球主要的能源問題包含：

- (1) 石油蘊藏量日益減少，燃油仍是動力機械的主要能源。
- (2) 人口數量龐大的國家經濟快速成長，能源的需求使市場競爭激烈。
- (3) 在石油輸出組織國家的運作下，石油價格日益高漲。
- (4) 核安事件強化反核運動及核能安全提升的需求。

我國的能源問題包含：

- (1) 能源幾乎完全依賴進口，能源結構受制於國際能源價格影響。
- (2) 過去十五年能源消費倍增，石油與煤炭能源佔總供應量八成以上。
- (3) 核能發電受到質疑與挑戰。

### 2.1.1 再生能源

再生能源為來自大自然的能源，例如：太陽能、風能、潮汐能、地熱、生質能等，是取之不盡，用之不竭的能量。以下為台電公司(2009)對台灣再生能源(風力及太陽能)的評估說明：

- (1) 風力發電：台灣為一海島，每年約有半年以上的東北季風期，全年平均風速大於 4 m/s 的區域，總面積約達 2,000 平方公里，例如臺灣中北部山區、西部沿海及離島等均屬風能資源豐富地區，極適合開發風力發電，根據能源局評估結果，預估計可開發之總裝置容量可達 220 萬瓩以上。如此優越的風能潛力，再加上台灣地區自產能源貧乏，開發國內自產風力能源更顯其重要性，在此主客觀因素下，風力發電自然成為台灣發展再生能源發電之首要選擇。
- (2) 太陽能：台灣地區雖地處亞熱帶，但因氣候條件影響，日照時間不如同緯度其他地區優越，夏秋期間颱風頻繁，加上目前太陽能電池設備投資費用仍相當昂貴，因此限制了台灣地區太陽能發電之發展。太陽光電仍無法克服陰雨天發電問題，太陽能仍屬間歇性能源，無法接受調度，故在規劃開發太陽光電時，亦必須同時投資興建其他傳統電源，以確保電力穩定供應。

圖 2-1(a)為經濟部能源局統計 2010 年我國能源供給的比例，可以看到我國初級能源對石油的依存度最高，佔了將近一半的比例，我國 99.57%的能源是倚賴傳統能源再生能源比例只佔 0.43%。圖 2-1(b)為我國 2010 年自產能源的供給比例，其中以水力佔的比例最高為 44.9%，太陽能及風力發電所佔的比例僅為 11.2%。

## 2.2 風力發電

離岸風力發電機(如圖 2-2)是運用風機的葉片旋轉，將離岸風場的風能轉化為機械能，風機內的發電機再將機械能轉化為電能，經由海底電纜將電力輸送至變電所供大眾使用。經濟部技術處所出版「前瞻全球離岸風力發電技術與台灣產業機會分析」(2010)指出，離岸風力發電有著以下優點:

- (1) 規劃完整:可使用較大面積風場進行較完整的規劃。
- (2) 高風速:由於海水面十分光滑，摩擦力較小，風剪效應越小，因此不需要很高的塔架，可降低風力機架設成本。
- (3) 低擾流:海上風擾流強度低，可使機組承受的疲勞負荷較低，延長風機壽命。
- (4) 高產出:海上風速較陸上風速大而穩定，且離岸風機對噪音要求較低，所以可以透過高轉速及高電壓達到較好的發電效率，進而獲取更高的能量產出。

同時離岸風力發電也有著以下缺點:

- (1) 需使用海中基礎，施工困難，造價昂貴
- (2) 海上風場，一般平均風速較高，可施工、吊裝的時間受限，工期長、難度高且風險較大
- (3) 維護成本高，需動用船舶或直升機等交通工具，所費不貲
- (4) 由於接近困難，萬一故障或無法定期維修，導致停機，可能使停電時間過長，降低可使用率

### 2.2.1 台灣風場特性

自 1991 年丹麥設置了世界第一座離岸風機，20 多年來有關離岸風機的相關技術不斷的精進，使得這個天然能源逐漸受到重視。圖 2-3 為工業技術研究院能環所(2007)對台灣離岸風場的調查結果，圖中顯示台北至彰化離岸風場的滿發時數為 2,800~3,200 小時，滿發時數是指一年風力達每秒 10 公尺，可讓風機滿載發



電的時間。雲嘉南離岸風場也有 2,400~3,000 小時的滿發時數。澎湖更可達 3,300~3,900 的滿發時數，均比世界平均 2,000 滿發小時更長，圖 2-3 顯示台灣西岸海域頗為適合離岸風力發電的發展。

## 2.2.2 離岸風機的基礎

離岸風機在大海中，必須承受鹽分、重力、風力、波浪推力、地震力等作用，並保持長期屹立不搖，因此離岸風機座落在海上的基礎型式的選擇、設計、施工必須仔細考量。經濟部技術部「前瞻全球離岸風力發電技術與台灣產業機會分析」(2010)指出，在不同的海床深度，離岸風機必須採用不同的基礎型式如圖 2-4 顯示。在 0~30 m 深度的海床，常採用單樁式基礎(mono pile)。單樁式基礎是由一根直徑 3.5 m ~ 4 m 的鋼管柱構成，鋼管底部安裝在海床下 10~20 m，單樁式技術的主要優點就是簡單實用，且不須對海床進行整理。在 30~60 m 深度的海床可考慮採用三腳架(tripod)式基礎支撐風機，三腳架由直徑 1~5m 的鋼管焊接而成，製造不易，但較不受海水沖蝕影響。在 60~900 m 深度的海床可考慮浮動式基礎，目前尚在試驗階段。重力式基礎(gravity type)主要適用於 5 公尺水深以下之前海地區。表 2-1 說明重力式、單樁式、三腳式基礎優缺點。重力式基礎主要利用較大底部的平版基礎，不須打樁，成本較低。

## 2.3 自升式安裝船

Gaudin et al. (2011)說明，自升式安裝船(如圖2-5)是一個移動式工作平台(platform)，包含一個水密性的浮動船身(buoyant hull)，並有四隻可以獨立移動的支撐腳(movable leg)，支撐腳下側基腳(spudcan)支撐至海床。將自升式安裝船支撐腳收縮至船身上方(圖2-6)，並將船身拖達工作地點後，再伸出支撐腳接觸海床，自升式平台船利用船體自身重量進行預壓，將spudcan貫入海床固定。通常將四

雙支撐腳分為兩組，對角線兩隻腳為一組，些微升起一組支撐腳使利用重量將另一組對支撐腳壓入海床，且不在沉陷為止。兩組支撐腳輪流施壓，直到四隻支撐腳所受極限承载力足以支撐安裝船兩倍重量(安全係數為2)，形成穩定安裝風機之工作平台，如圖2-7顯示自升式鑽油平台之支撐腳及spudcan支撐於海床土壤。

### 2.3.1 風機基礎及風機之安裝

以單樁式基礎為例，呂威賢(2012)說明典型離岸風機基礎之安裝步驟:

Step1: 基礎沖刷防護層級配料鋪設，如圖2-8(a)。

Step2: 基樁吊裝，如圖2-8(b)。

Step3: 基樁定位及安裝，如圖2-9(a)。

Step4: 基樁安裝確認與標示，如圖2-9(b)。

Step5: 轉換段安裝，如圖2-9(c)。

Step6: 基礎沖刷防護塊石鋪設，如圖2-10(a)。

Step7: 安裝工作台-基礎完成，如圖2-10(b)。

以下說明典型離岸風機之安裝:

Step1:風力機岸上整備，儘量在岸上工作，以減少海上工作時間，降低海上工作風險，降低施工成本，如圖2-11(a)。

Step2:風力機裝船準備，如圖2-11(b)。

Step3:風力機塔架下段安裝，如圖2-12(a)。

Step4:風力機塔架上段安裝，如圖2-12(b)。

Step5:風力機吊裝，如圖2-13(a)

Step6:風力機第三片葉片吊裝，如圖2-13(b)

## 2.4 支撐基腳破壞模式

圖 2-14 顯示支撐腳(leg)下方的支撐基腳(spudcan)，支撐基腳的形狀多為扁平圓錐狀(conical shape)。使用支撐基腳的目的以 $\sigma = F/A$  說明， $\sigma$ 為支撐腳與海底土壤間正應力、 $F$ 為支撐基腳傳遞之垂直加載力、 $A$ 為支撐基腳面積，支撐基腳的面積  $A$  加大，可以減輕支撐基腳承受的應力 $\sigma$ ，避免支撐腳受壓貫入海底。

### 2.4.1 Spudcan 破壞案例

依據英國健康安全局 (Health & Safety Execution 2009) 的統計，約三分之一的自升式平台船發生事故的起因，多源自於基礎的問題，這些基礎問題可以分為貫穿破壞、海床不平整、海床不穩定、筏式基礎滑動式破壞、海床不穩定、及非預期貫穿等(圖 2-15)。

將自升式平台船基礎破壞模式彙整如下：

- (1) 貫穿破壞佔了其中 53%，為比例最大的破壞模式。進一步探討貫穿破壞的原因，發現預壓時發生貫穿破壞佔 14%，於颱風期間發生貫穿破壞佔了 8%，有 31%的貫穿破壞之發生期間未確定。
- (2) 有 15%的貫穿破壞起因於海床的不平整，包含了海床沖蝕，及過去 spudcan 下腳掌痕的影響。
- (3) 筏式基礎滑動佔了 10%，與圓形支撐基腳相比，筏式基礎較易發生滑動破壞。

## 2.5 淺基礎造成土壤破壞模式

Vesic(1973)的模型實驗研究發現，淺基礎(shallow foundation)承载力破壞的模式可以分以下三大類:(1)全面剪力破壞(general shear failure)；(2)局部剪力破壞(local shear failure)；及(3)貫穿剪力破壞(punching shear failure)。在圖 2-16 中，(a)

若支承土壤為緊密砂土，施加垂直載重則發生全面剪力破壞。(b)若支承土壤為中等緊密砂土，施加垂直載重則發生局部剪力破壞。(c)若支承土壤為極疏鬆砂土，則發生貫穿剪力破壞。圖 2-17(a)顯示，淺基礎貫穿式剪力破壞的破壞面主要發生在基腳下方，不會如同全面剪力破壞般延伸至地表面。圖 2-17(b)顯示，貫穿基腳的沉陷量  $S$  隨著垂直壓力  $q$  增加而增加，載重  $q$  超過極限支承力  $q_u$  後， $q$ ~ $s$  關係變得很陡，而且近似直線狀。Vesic(1973)建議以下列之圖 2-18 來分辨淺基礎承受垂直載重，可能發生的破壞模式，圖 2-18 中，橫軸代表砂土緊密的程度， $B^*$  代表淺基礎寬度， $D_f$  代表基腳貫入深度。

## 2.6 基腳支承力理論

以下將分別對 Terzaghi 淺基礎支承力理論，及 SNAME(2008)基腳支承力設計規範進行介紹。

### 2.6.1 Terzaghi 淺基礎支承力理論

Terzaghi(1943)建議，對一連續或條形基腳，在極限載重下，土壤全面剪力破壞之破壞面可以假設如圖 2-19 所示。基礎下之破壞區可區分為三區:(a)基腳下楔形區 I 為彈性區，破壞面與水平面夾角為  $\alpha$ ；(b)輻射剪力區 II，此區之破壞線為對數螺旋圓弧；(c)蘭金被動土壓力區 III，破壞線為一條直線。利用平衡分析，Terzaghi 將條形基礎之極限承載力  $q_u$  以下式表示：

$$q_u = cN_c + qN_q + 1/2 \gamma BN_r \quad (2.1)$$

若考慮圓形基腳之極限承載力  $q_u$ ，須對(2.1)式做形狀修正以(2.2)式表示：

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.3 \gamma BN_r \quad (2.2)$$

(2.1)及(2.2)式中， $c$  代表土壤凝聚力， $q$  代表支承面覆土壓力， $\gamma$  代表土壤單位重， $B$  代表基腳寬度， $N_c$ 、 $N_q$ 、及  $N_r$ ，代表土壤支承係數。

## 2.6.2 SNAME 基腳支承力設計規範

SNAME(2008)手冊建議支撐基腳於砂土中之支承力設計規範說明如下。如圖 2-20 所示，對一直徑為  $B$ ，有效支撐面積為  $A$  之支撐基腳，施加垂直載重  $Q_v$ ，貫入砂土層深度  $D$  時之垂直極限承載力  $F_v$  以(2.3)式表示：

$$F_v = (0.5 \gamma' B N_\gamma s_\gamma d_\gamma + p_o' N_q s_q d_q) A \quad (2.3)$$

(2.3)式中， $\gamma'$ 代表土壤單位重， $p_o'$ 代表在深度  $D$  時之有效覆土壓力， $N_q$ 、 $N_r$ ，代表土壤支承係數， $s_\gamma$ 、 $s_q$  代表形狀因數， $d_\gamma$ 、 $d_q$  代表承載力深度因數。

## 2.7 Spudcan 行為之離心機模型試驗

以下介紹國立新加坡大學(National University of Singapore, NUS)及西澳大利亞大學(University of Western Australia, UWA)在實驗室以離心機試驗研究 spudcan 貫入海床土壤的模型試驗。

### 2.7.1 NUS 離心機模型試驗

Lu (2007)進行支撐基腳貫入土壤的離心機試驗，離心機的功能在於，將試驗模型放置於離心機一側抓斗內，另一側抓斗放置平衡砝碼(counter weight)，藉著離心機的快速旋轉提高加速度至  $N$  倍的重力場，藉以放大  $N$  倍模型的受力狀況 ( $\sigma_v = \gamma z = \rho \cdot g \cdot z$ )。

圖 2-21(a)試驗土槽內之土層分為上下兩層，上層為厚度 50 mm 之砂土，其相對密度為  $D_r = 77\%$ ，下層為不排水剪力強度  $S_u = 10 \text{ kPa}$  之正常壓密黏土。Spudcan 垂直貫入土壤速率為  $0.05 \text{ mm/s}$ ，模型支撐基腳直徑為 6 mm，以  $100g$  離心加速度模擬直徑  $D = 6 \text{ m}$  之 spudcan 實驗設備如圖 2-21(b)所示，2-21(a)上方有可量測 spudcan 垂直位移的長距離電位式位移計(long-travel potentiometer)，及量測垂直作用力的荷重計(load cell)。以液壓缸(hydraulic cylinder)加壓 spudcan 向下貫入土層，試驗土槽壓克力視窗前方設有相機記錄土層受壓破壞模式。圖 2-22 為實驗結果圖，圖 2-22(a)顯示，spudcan 貫入土層的起始點，是以 spudcan 腳掌的下側斜面與底部圓錐體的交界處。圖 2-22 (b)顯示，當直徑 6 m 之 spudcan 向下貫入 1 m，砂土逐漸向下位移，擠壓到黏土層，黏土因為受到推擠而逐漸側向移動。圖 2-22(c)顯示，當 spudcan 貫入約 5 m，spudcan 下側砂土隨著 spudcan 向下貫入，產生大量位移擠壓下層黏土，使黏土往兩側及往上方位移，造成表面土壤略微隆起。圖 2-22 (d)說明，當 spudcan 貫入達海底土壤 7 m，在 spudcan 下方  $1D$  及 spudcan 兩側約  $D/2$  的土壤受到擾動產生位移，且 spudcan 上方海床表面大量沉陷。

## 2.7.2 UWA 離心機模型試驗

Hossain et al. (2010)進行支撐基腳貫入土壤之離心機試驗，實驗箱內之土層分為兩層，上層為高嶺土其不排水剪力強度為  $C_{u1}$ ，下層為軟弱黏土其剪力強度為  $C_{u2}$ ， $C_{u2}/C_{u1} = 0.29$ ，模擬直徑 6 m 之 spudcan 貫穿薄殼土層後進入軟弱土層，實驗結果如圖 2-23 所示。圖中， $B = 60 \text{ mm}$  為支撐基腳的直徑，以  $100g$  離心加速度模擬直徑  $B = 6 \text{ m}$  之 spudcan，為上層黏土厚度  $H = 45 \text{ mm}$ ， $D$  為支撐腳貫入深度。圖 2-23 (a)、(b)的實驗結果顯示，spudcan 初始貫入時，隨著 spudcan 貫入深度的增加，上方殼層(crust layer)所承受的垂直應力也逐漸增加。圖 2-23(c)、(d)顯示，spudcan 進一步貫入，隨著上方殼層的貫穿破壞，spudcan 及下方土楔

貫入造成下層土壤形成位移。圖 2-23(e)可以觀察到，支撐基腳貫入深度達 spudcan 直徑  $1B$ ，而下層土壤為軟弱黏土時，使 spudcan 下側  $0.8H$  土壤受到擾動，伴隨著下側土壤回流(backflow)至 spudcan 上方，spudcan 左右兩側土壤位移不明顯。

## 2.8 Spudcan 行為之數值模擬

Qiu and Henke (2011)使用數值模擬，分析支撐基腳在上層為疏鬆砂土下層為黏土狀況，土層的破壞機制。如圖 2-23，上層砂土厚度為  $7\text{ m}$ ，相對密度為  $24\%$ ，內摩擦角  $\phi = 32^\circ$ 。下層黏土厚度為  $46\text{ m}$ ，其不排水剪力強度為  $30\text{ kPa}$ 。將直徑  $14\text{ m}$  的支撐基腳貫入土層不同深度，分析的成果如圖 2-24 所示，由圖 2-24(c)可以觀察到，當支撐基腳貫入至砂土與黏土交界處( $7\text{ m}$ )，spudcan 上層海床土壤發生下陷及回流，spudcan 下側  $7.1\text{ m}$  黏土層發生明顯位移，spudcan 兩側土壤位移不明顯。

## 第三章

### 支撐基腳模型試驗之儀器設計與建造

本章對自升式安裝船支撐基腳試驗模型的設計進行說明。台灣電力公司(2009)的地質調查報告顯示，台灣西部沿海地區之海床，多為飽和黏土質疏鬆砂土及黏土。當自升式安裝船下腳進行預壓作業時，依據 Vesic (1973)之承载力理論，支撐基腳可能發生貫穿式剪力破壞。本研究以實驗方法探討 spudcan 承受垂直荷重，在飽和疏鬆砂土造成之破壞機制。國立交通大學(NCTU)支撐基腳模型試驗設備包含以下 5 個部分：(1)反力架；(2)試驗土槽；(3)支撐基腳；(4)垂直荷重加載系統；及(5)資料擷取系統，以下各節分別加以說明。本研究採用渥太華標準砂(Ottawa sand)為試驗土樣。圖 3-1 顯示國立交通大學基礎模型實驗室之平面配置，本研究所設計之 Spudcan 模型實驗設備位於圖 3-1 之右下方。

#### 3.1 反力架

為支撐 spudcan 向下貫入土層造成的反力，需在實驗土槽上方設置反力架 (Reaction frame)，如圖 3-2 所示。反力架由以下三個部分組成：(1) 4 支 100 mm×100 mm×2180 mm H 型鋼柱；(2) 2 支 100 mm×100 mm×1500 mm H 型水平鋼樑；及 (3) 一支 100 mm×100 mm×1900 mm 的移動式反力梁(movable reaction beam)，如圖 3-3(a)所示。4 支鋼柱底部焊接 20 mm 厚的硬質合金柱腳，以四支鋼質螺栓向下貫入 120 mm 固定於厚度達 500 mm 的鋼筋混凝土樓板上，螺母以植筋膠固定於樓板。兩支水平鋼樑與四支鋼柱之間以螺栓固定。水平鋼樑上方架設一支移動式反力梁，如圖 3-4 所示。



## 3.2 試驗土槽之設計

以下介紹國立新加坡大學NUS試驗土槽及NCTU試驗土槽的設計。

### 3.2.1 NUS 試驗土槽

如圖 3-5 所示，NUS 土槽的正面為一片極厚之壓克力視窗，其主要用途是當 spudcan 向下貫入時可以清楚的看到基腳周圍土壤之破壞模式，壓克力外側的黑點為不動之參考點。在壓克力板的周圍以「口」字型的不鏽鋼框加強，並以螺栓與壓克力視窗結合(圖 3-5)，此鋼框是為了對壓克力牆周邊加勁，避免壓克力板因過大側向土水壓力發生變形。因離心機高速旋轉造成 100g 的加速度，使原本承受的土壓力、水壓力都放大 100 倍，所以土槽前方的壓克力及鋼框厚度都非常厚(圖 3-6)。

因為新加坡大學採用黏土模擬海床土壤，所以在以試體準備之垂直加載過程需壓密排水，土槽後方的洞口及水管是土壤壓密時用來排水。由圖 3-6 知，NUS 土槽是由四個部分不銹鋼材所組成，在離心試驗 100g 重力作用下土槽內水壓很大，各部分交接處的防止漏水就顯得格外的重要。新加坡大學的做法是在各部分交接處，夾一塊防漏水的橡膠墊片(rubber gasket)，以螺栓穿過並拴緊，達成防止漏水的目的，如圖 3-7 所示。

### 3.2.2 NCTU 試驗土槽之設計

本研究考慮到台灣西部海床大多為疏鬆砂土及軟弱黏土，所以 NCTU 土槽之設計，首先考慮使用飽和疏鬆砂土來模擬海床土壤。

新加坡大學離心機試驗的結果(圖 2-22(c))顯示，一支直徑  $D = 6\text{ m}$  的 spudcan 貫入海床土壤 5 m，在 spudcan 下側  $1D$  及兩側  $D/2$  的土壤受到擾動，發生明顯的位移。西澳大利亞大學的離心機試驗結果(Hossain, 2010)顯示(圖 2-23 (e))，一

一支直徑 6 m 的 spudcan 貫入黏土 6 m，在 spudcan 下側 3.6 m 的土壤受到擾動，並發生明顯的位移，spudcan 兩側土壤位移不明顯。德國漢堡科技大學 Qiu and Henke (2011) 的數值分析結果顯示，一支直徑  $D = 14$  m 的 spudcan，貫入疏鬆砂土 ( $D_r = 24\%$ ,  $H = 7.0$  m) 及下層黏土 ( $q_u = 30$  kPa,  $H = 46$  m) 至 7 m 處，在 spudcan 下方至  $D/2 = 7.1$  m 的土壤發生明顯位移，spudcan 兩側土壤位移量非常小。

基於上述研究結果，圖 3-2 為 NCTU 試驗土槽(soil bin)的前視圖，土槽寬 900 mm，高 1,100 mm，槽內填入(a)高 900 mm 的飽和土壤，100 mm 的水，及 100 mm 的預留乾舷(freeboard)。整個土槽由於長期充水，所以採用不銹鋼材製成。設計的概念是以 spudcan 直徑  $D = 300$  mm 為主要考量，試驗時支撐基腳向下貫入一個基腳直徑 ( $D = 300$  mm)，spudcan 下方預留兩個基腳直徑 ( $2D = 600$  mm) 的空間供發展剪力破壞面。預估 spudcan 左右兩邊的影響範圍較小，故各預留一個基腳直徑 ( $D = 300$  mm) 的空間。圖 3-3(a) 為 NCTU 試驗土槽的側視圖，圖中土槽厚度為 450 mm，土壤試體前方壓克力視窗厚達 50 mm，並以厚度 50 mm 的鋼框加勁，以降低壓克力視窗受壓變形。土槽下方為長 1200 mm，寬 800 mm，高 120 mm 的底座。

### 3.2.3 水中賈降土壤之篩網設計

為在 NCTU 試驗土槽中，製作出飽和且疏鬆的砂土試體，以模擬台灣西部沿海的海床土壤，本研究採用水中賈降法製作均勻土壤試體、並控制砂土密度。水中賈降法是將飽和砂，放在水中的篩網(sieve)上，搖動篩網將濕砂篩落水中，以模擬沖積土壤經河流沖刷搬運至沿海區域，緩緩沉積的海床土壤，詳細實驗步驟將在第四章說明。本研究擬使用 10 號、20 號及 30 號篩網，探討篩網號開口尺寸、及土壤沉降距離，對沉積砂土相對密度之影響。本研究自行設計試驗土槽使用之長方形篩網長 800 mm、寬 350 mm，如圖 3-8 所示。

### 3.3. 支撐基腳之設計

#### 3.3.1 UWA 及 NUS 之 Spudcan 模型介紹

本節介紹西澳大利亞大學(UWA)及國立新加坡大學(NUS) spudcan 模型試驗使用的支撐基腳模型。本研究首先定義 spudcan 各部位尺寸及角度，如圖 3-9 所示， $D_{leg}$  代表支撐腳直徑， $\theta_{ui}$  為 spudcan 上側與水平線夾角， $\theta_{li}$  為 spudcan 下側與水平線之夾角， $\theta_c$  為錐尖角度， $H_c$  為錐尖高， $T_d$  為 spudcan 中層厚度， $D_{sc}$  為支 spudcan 直徑。圖 3-10 為 NUS 離心機試驗所使用之支撐基腳(Lu 2007)，支撐基腳直徑為 100 mm，錐尖角度為  $80^\circ$ 。圖 3-11 為 UWA 模型試驗使用之支撐基腳，支撐基腳直徑為 60 mm，spudcan 上下側傾斜角度皆為  $13^\circ$ ，錐尖角度為  $76^\circ$ 。本研究將所收集到文獻記載之 spudcan 尺寸及夾角整理成表 3-1。

#### 3.3.2 NCTU spudcan 設計

圖 3-12 顯示 NCTU 試驗使用之支撐基腳模型，圖中所示為 half-spudcan，支撐基腳直徑  $D_{sc} = 300$  mm，spudcan 上側與水平線夾角  $\theta_{ui} = 19^\circ$ ，spudcan 下側傾角  $\theta_{li} = 13^\circ$ ，錐尖角度為  $\theta_c = 76^\circ$ ，錐尖長度  $H_c = 32.2$  mm。製作半支式支撐基腳目的在於，half-spudcan 的中央剖面可以沿著壓克力牆向下貫入土壤試體，方便透過壓克力視窗觀察中央剖面土壤剪力破壞機制。在 half-spudcan 的剖面貼上一層橡膠墊層，以避免鋼製 spudcan 模型刮花壓克力視窗。基腳上方之施加垂直荷重的之支撐腳(leg)必須安排位於 spudcan 重心的位置，以避免施加垂直載重過程，產生偏心的現象。

### 3.4 垂直荷重加載設備

本研究使用之垂直荷重加載系統包含下列 3 個部分：(1)機械式馬達齒輪箱 (rack and pinion gearbox)；(2)齒輪箱控制器(control panel)；(3) 荷重計(load cell)，如圖 3-13 所示：

#### 3.4.1 機械式馬達齒輪箱

本研究使用機械式馬達齒輪箱，如圖 3-14 所示，推動 spudcan 的上升及下降。馬達齒輪箱的最大輸出力量是 20 kN。本系統的馬達是由 LEESON 製造，型號為 C41D17FK2A。馬達齒輪箱加載的力量(20 kN)不會超過荷重計能承受的荷重(20 kN)。本機械式馬達齒輪箱的最大衝程是 390 mm，超出 spudcan 貫入土壤最大位移量  $1D = 300 \text{ mm}$  之需求。

#### 3.4.2 馬達齒輪箱控制器

如圖 3-15 所示，控制器是用來控制機械式馬達齒輪箱的推桿(及 spudcan)的上升、下降及升降速度，可控制的速度範圍為 0.05~200 mm/min。

#### 3.4.3 荷重計

本研究使用荷重計測量 spudcan 下降及上升對土壤施加的壓力及張力，荷重計(Kyowa LUX-B-20kN-ID，Capacity = 20 kN)如圖 3-16 所示。試驗時荷重計被安裝在馬達齒輪箱推桿的下方，如圖 3.2(c)所示。

### 3.4.4 電位式位移計

本研究使用電位式位移計(potentiometer-type displacement transducer)，量測實驗過程 spudcan 的垂直位移量。圖 3-17 顯示電位式位移計(Kyowa DTP-D-1ks)，可藉由電位轉化感應導線量測 spudcan 拉伸或收縮的位移量，其最大量測位移為 1,000 mm，最大反應速度為 200 mm/s。位移計架之安裝置如圖 3-2(d)所示，位移感應器被固定在反力梁上，拉線預先拉伸一長度，並以扣環(washer)套扣在馬達齒輪箱下方之推桿上，拉線隨著 spudcan 的下降上升而伸張收縮，可以測量 spudcan 的垂直位移量。

### 3.5 資料擷取系統

為了擷取荷重計與電位式位移計測得的試驗資料，本研究使用的資料擷取系統，是由以下三個部分組成(圖 3-18)：(1)動態應變放大器 (Kyowa：DPM-711B) (如圖 3-19)；(2) AD/DA 卡；及(3)個人電腦。從荷重計及位移計獲得之類比信號，經動態應變放大器濾波及放大後，以 AD/DA 卡轉換為數位資料。PC 內的 LabVIEW 程式用來收集、儲存及分析獲得的測試資料。

## 第四章

### 備製疏鬆飽和砂土試體

本章介紹台灣西部濱海地區離岸風力發電機之海床土壤之特性、及如何在實驗室製作疏鬆飽和砂土試體，供 spudcan 貫入試驗使用。經濟部中央地質調查所報告(2000)，彰化縣沿海地區地質屬於全新世之現代沖積層，包括潟湖、海岸及河道沖積層，其北半部沿海沉積物主要是由砂岩及頁岩分布區的大肚溪沖積而成。其南半部地區，沉積物主要是由行經板岩及頁岩分布區的北斗溪、濁水溪、虎尾溪及北港溪等河流搬運而來。

台灣電力公司(2009)委託中興顧問公司對彰化離岸風力發電區進行地質鑽探、現場試驗、室內試驗及地球物理探測，獲得現地海床土壤種類及土壤性質。本研究依據 Das (2010)建議的經驗關係，將海床砂土之 SPT-N 值轉換為土壤之相對密度，做為在實驗室製作海床土壤試體之參考。

本章最後一節，發展出水中質降法(water pluviation)在水中製作均勻砂土試體，並以篩網開口大小、及砂土沉降落距控制試驗土樣之相對密度，模擬台灣西部沿沖積土壤於海水中緩慢沉澱形成之土層。

#### 4.1 台灣西部沿海海床土壤特性

圖 4-1 顯示，彰化離岸風力發電計畫之風場位置，位於台灣海峽彰化外海大肚溪口與濁水溪口之間海域，南北長約 35 公里，寬約 7 公里。該計畫主要分為兩個計畫區，北為彰濱區，南為芳苑區。圖 4-2 之台灣海底地形資料顯示，台灣東部海域深度過深，不適合發展離岸風力發電。台灣西部海域相對平緩，較適合

發展離岸風能。圖 4-2 之彰化風力發電計畫區位於台灣西部台灣海峽之雲彰隆起地形，其南側為深度陡降之澎湖水道，西側則有烏坵凹陷地形。圖 4-3 為台灣地體構造相關資料（經濟部中央地質調查所 2000），圖中彰化風力發電計畫區位於板塊構造扭曲之緩衝帶，地體構造運動相對緩和，無任何地質構造線紀錄，適合發展離岸風力發電。

#### 4.1.1 地質調查結果

台灣電力公司委託工程顧問公司對彰化風力發電計畫區進行海域地質調查。以下將分別就以下三種調查方法：(a)地質鑽探；(b)現場試驗；及(c)室內試驗，獲得之結果進行說明：

##### (a) 地質鑽探：

如圖 4-4 所示，台灣電力公司於彰化外海離岸風力發電計畫區進行 9 個地質鑽孔(BH-01 ~ BH-09)，繪出圖 4-5 及圖 4-6 兩張地質剖面圖，圖中顯示計畫區海域附近海床沉積物主要由粉土質細砂(SM)與低塑性黏土(CL)組成，中間夾含薄層黏土質粉土(ML)、含粉土之砂層(SP-SM)、粉土質黏土(CL-ML)、及黏土質砂(SC)。沉積物厚度至少 80 m。

##### (b) 現場試驗：

各鑽孔每 1.5 m 進行標準貫入試驗(Standard Penetration Test, SPT)，以外徑兩吋(50.8 mm)的劈管取樣一次，得到深度與 SPT-N 值之分布圖如圖 4-7 顯示。圖中海床沉積層之 SPT-N 值隨著海床的深度增加而增加。在不考慮 20~30 m 及 75~80 m SPT-N 值資料較為離散的情況下，調查單位進行回歸，得到計畫區標準貫入試驗 N 值之簡化公式：

$$N = (\text{海床下深度} + 32) / 4 \quad (4.1)$$

海床下深度之單位為 m。

(c) 室內試驗:

調查單位配合鑽探過程，將劈管、薄管取得土樣進行各種室內試驗，台灣電力公司說明其結果如下：土壤有效摩擦角約為  $26.9^{\circ} \sim 33.6^{\circ}$  (土壤直接剪力試驗)，無圍壓縮強度約為  $0.21 \sim 0.89 \text{ kgf/cm}^2$  (土壤無圍壓縮試驗)，壓縮指數約為  $0.156 \sim 0.270$  (單向度壓密試驗)，總應力凝聚力(cohesion)約為  $0.17 \sim 0.52 \text{ kgf/cm}^2$ ，總應力抗剪角約為  $11.6^{\circ} \sim 22.5^{\circ}$ ，有效凝聚力為 0，有效抗剪角約為  $27.8^{\circ} \sim 33.7^{\circ}$  (土壤三軸壓密不排水試驗，CU test)，尖峰凝聚力為 0，尖峰抗剪角約  $35.4^{\circ} \sim 36.9^{\circ}$  (土壤三軸壓密排水試驗，CD test)。本研究將上述試驗結果整理成表 4-1。

## 4.2 備製飽和疏鬆砂土試體

### 4.2.1 試驗土壤

本研究使用渥太華砂(ASTM C-778)為試驗土樣。Chen (2003)說明，該土壤的物理屬性包含比重  $G_s = 2.65$ ，最大孔隙比  $e_{\max} = 0.76$ ，最小孔隙比  $e_{\min} = 0.50$ ，有效粒徑  $D_{10} = 0.21 \text{ mm}$  及均勻係數  $C_u = 1.52$ ，其粒徑分布曲線如圖 4-8。選擇渥太華標準試驗砂為試驗材料的主要考慮因素如下：

- (1) 圓形顆粒，可以避免土粒棱角性(angularity)的影響。
- (2) 均勻分佈的顆粒尺寸 ( $C_u = 1.52$ )，可以避免土壤顆粒級配的影響。
- (3) 固體顆粒的高剛性，減少在荷載作用下土壤顆粒崩解的可能性。
- (4) 砂土高滲透性，允許快速排水，因此降低土壤的超額孔隙水壓。

### 4.2.2 水中砂土之相對密度

Das (2010)建議，砂土之標準貫入試驗 N 值與其相對密度  $D_r$  及內摩擦角  $\phi$  有



表4.2之經驗關係。圖 4-9 顯示，假設風機安裝船之 spudcan 直徑  $D = 6 \text{ m}$ ，向下貫入海床一個基腳直徑  $1D = 6 \text{ m}$ ，並在 spudcan 下側發展出一個深度  $1D = 6 \text{ m}$  的破壞面(依據 Lu 2007 之實驗結果)。依此假設，本研究主要關心海床表面下  $2D = 12 \text{ m}$  深度內之土壤性質。

以 BH-04 鑽孔為例，海床面下 0~12 m 的土壤為疏鬆至中等緊密之砂土，N 值介於 8-21(表 4-3)。由表 4-2 可以推估此土層之相對密度大約為  $D_r = 20 \sim 46\%$ ，其內摩擦角  $\phi = 32^\circ \sim 39^\circ$ 。BH-09 鑽孔 0~12 m 深度砂土  $N = 7 \sim 18$ ，其相對密度大約為  $D_r = 15 \sim 41\%$ ，內摩擦角  $\phi = 31^\circ \sim 37^\circ$ 。

由上述推論可知，彰化離岸風力計畫區海床(依鑽孔 BH-04 及 BH-09 SPT 試驗結果)表面至 12 m 深度砂土之 SPT-N 值大約介於 7~21 之間，其相對密度介於  $D_r = 15 \sim 46\%$ ，這些土壤性質參數成為備製海床砂土試體之目標值。表 4-3 整理出 BH-01 至 BH-09 鑽孔，0 至 12 m 深度之 SPT-N 值，並標示土壤分類。

### 4.3 水中實降法與砂土密度控制

為了備製符合現地海床相對密度( $D_r = 15 \sim 46\%$ )之砂土試體，本試驗採用渥太華砂進行水中實降法製作均勻試體，期望建立篩網篩號(網孔大小)、與砂土在水中沉降落距及砂土相對密度之關係。試驗方法如下，首先將渥太華砂浸泡在水中數日，如圖 4-10，以模擬長期浸泡海床的土壤。試驗使用兩種試驗桶，大試驗桶高 650 mm，直徑為 550 mm，如圖 4-11 所示，小試驗桶高 440 mm，直徑 355 mm，如圖 4-12 所示。

圖 4-13 顯示將小試驗桶放入水深 600 mm 的大試驗桶內，再將飽和砂土置入試驗桶中，在桶底形成 50 mm 厚的土壤底層。圖 4-14 顯示本研究所使用之土壤密度盒，其直徑為 73.5mm，高度為 10 mm。圖 4-15 顯示將 3 個空密度盒放於小試驗桶中，圖 4-16(a)為密度盒在試驗桶內擺放位置之側視圖。圖 4-16(b)為水中實降法示意圖。本研究砂土在水中沉降的距離分別為 100 mm、200 mm 及 300 mm。圖 4-17 顯示使用 PVC 管將飽和砂土滑落至水中之篩網，然後砂土顆粒通過篩網

開口，沉降至密度盒內。本研究使用之三種篩網分別為 No. 10、No. 20、及 No. 30，其開孔尺寸分別為 2.00、0.85、及 0.60 mm。圖 4-18 顯示，於水中將落入密度盒之砂土試體刮平。圖 4-19 顯示將密度盒中的砂土及水放入鋼杯後，再放入烘箱中烘乾。取出鋼杯，測得杯內乾砂重量，由於已知控制盒之體積及砂土比重，可由乾土重計算出乾土體積、砂土孔隙比及相對密度。

#### 4.4 砂土密度試驗結果

本研究以實驗方法探討以水中賈降法備製砂土試體，篩網開口大小、及水中沉降落距對形成試體相對密度之影響，得到實驗結果如圖 4-20 及 4-21 所示，圖 4-20(a)、(b)、(c)分別為砂土通過 10 號篩網，在水中沉降落距 100 mm、200 mm、及 300 mm 得到的實驗成果。實驗結果顯示，砂土顆粒在水中沉降落距越長，形成砂土之相對密度越緊密。圖 4-21(a)、(b)、(c)分別為砂土顆粒通過 20 號篩網，在水中沉降落距 100 mm、200 mm、及 300 mm 得到的實驗成果。圖中亦顯示，當砂土沉降落距越大，形成砂土試體之相對密度越高。

以上實驗中，使用 20 號篩網、落距 200 mm(圖 4-21(b))所製作砂土試體之相對密度為 21% ~43%。使用 10 號篩網、落距 200 mm(圖 4-20(b))所製作試體的相對密度為 16% ~ 42%，皆符合台灣西部風力發電計劃區海床砂土相對密度  $D_r = 15\sim 46\%$  之要求。圖 4-22 顯示，以水中賈降法備製砂土試體，不論砂土顆粒通過 10 號或 20 號篩網，砂土試體之相對密度，皆隨砂土在水中沉降落距之增加而加大。圖 4-22 顯示，若欲形成相對密度為 15 ~ 46% 之試體，可以優先考慮使用 200 mm 之沉降落距。10 號篩網開口尺寸(2 mm)明顯大於 20 號篩網開口尺寸(0.85 mm)，因此使用 10 號篩在水中賈降砂土之作業速率明顯較快，可以優先考慮使用。

## 第五章

# Spudcan 模型初步試驗成果

本章對 spudcan 垂直加載試驗之初步成果進行說明。試驗內容包含：試體除氣試驗、壓克力視窗標示與潤滑、砂土密度控制試驗、及 spudcan 垂直加載試驗，以下分別加以說明。

### 5.1 試體除氣試驗

本研究為備製飽和砂土試體，採用真空幫浦(vacuum pump，如圖 5-1)進行除氣試驗，將槽內土壤孔隙之空氣抽出，模擬海床土壤長期浸泡水中之飽和狀況。試驗作法說明如下，首先以水管將水注入土槽至 600mm，再以水中實降法備製土壤試體於土槽至預定高度(900 mm)，在土槽上方放置橡膠條並塗上凡士林以形成氣密狀態，如圖 5-2(a)及(b)所示，然後蓋上壓克力蓋板，並以 12 隻夾具將蓋板與土槽上緣緊密結合防止漏氣，如圖 5-3 所示。蓋板上設有真空壓力表(0~76cm Hg)，可以量測抽氣過程土槽內之吸力。最後接上真空幫浦對試體進行除氣，如圖 5-4 所示。圖 5-5 顯示試體除氣試驗壓力與時間關係，實驗結果顯示於真空幫浦抽除氣過程，土槽內壓力會在短時間(約 120 秒內)往 1 大氣壓( $100\text{kN/m}^2$ )下降後趨於定值(約  $68\text{kN/m}^2$ )。抽氣前段時間(約 120 秒內)，可以從壓克力視窗看到少量小顆氣泡從土壤液體內上升，之後即不再見到氣泡排出。

## 5.2 壓克力視窗標示與潤滑層

### 5.2.1 壓克力視窗標示

為觀察 spudcan 貫入飽和土壤過程，渥太華砂受到擠壓產生的位移情況，本研究於壓克力視窗標示固定點，作法如下。在壓克力視窗外側黏貼紅色圓點，各圓點的相對位置如圖 5-6 所示，點與點之水平間距為 225 mm，垂直間距為 50 mm，紅點黏貼於壓克力視窗外側為不動之參考點。

於壓克力視窗內側鋪設一層潤滑層及一層內側塑膠膜，內側塑膠膜的作用在於，當飽和砂土因 spudcan 貫入土層受到擠壓而產生位移，土壤位移帶動內側塑膠膜移動，此時塑膠膜位移即土層位移。本研究在內側塑膠膜外側黏貼藍色圓點，藉由觀察藍色圓點與紅色圓點的相對位移可以量測土層位移的情形，如圖 5-7(a) 及(b) 所示。加載試體前，壓克力視窗上紅色圓點與內側塑膠膜上之藍點重合，圖 5-7(b)，之試驗技巧尚有進步空間。

### 5.2.2 潤滑層

為減少垂直荷重加載過程飽和砂試體與固定不動壓克力視窗之間的摩擦力，本研究採用 Tatsuoka(1985)建議的方法，使用矽油(Silicone Grease, Shin-Etsu KS-64)如圖 5-8 所示，以及塑膠膜如圖 5-9 作法為將 KS-64 矽油塗抹於壓克力視窗(如圖 5-10)，再將塑膠膜鋪設於壓克力牆內側形成潤滑層，如圖 5-11 所示。

## 5.3 備製疏鬆砂土試體

### 5.3.1 砂土密度控制試驗

本研究採用第三章所設計長 800 mm、寬 350 mm 之長方形篩網備製符合現地海床土壤相對密度( $D_r=15\sim46\%$ )之疏鬆飽和砂土試體。依據第四章砂土密度試驗結果，以下採用 No.10 篩網以落距 200 mm，在長 900 mm，寬 450 mm，高 1100

mm 試驗土槽中，以水中質降法備製砂土試體。

試驗方法說明如下。首先在土槽內注水，將飽和渥太華砂填入土槽至 600 mm，形成土壤底層如圖 5-12 所示。由於土槽底部不易放入及取出密度控制盒，故本研究僅探討頂部 300 mm 之砂土密度。在 600 mm 處擺放密度盒，圖 5-13 顯示密度盒擺放位置之前視圖，圖 5-14 顯示密度盒擺放位置之俯視圖。圖 5-15(a)(b) 為水中質降法示意圖。圖 5-16 顯示以 No.10 長方形篩網落距 200 mm，備製砂土試體至。圖 5-13 顯示，從高度 600mm 開始，備製 6 層每層厚度 50mm 之土層，持續填土至高度 900 mm 為止。蓋上壓克力蓋板進行試體除氣，使土壤飽和。於水中挖出密度盒，並將盒內之砂土試體刮平如圖 5-。最後將密度盒中的砂土及水放入鋼杯後，放入烘箱中烘乾。取出鋼杯，測得杯內乾砂重量，可由乾土重計算出乾土體積、砂土孔隙比及相對密度。

### 5.3.2 砂土密度控制試驗結果

圖 5-17 顯示於土槽中以水中沉降法進行砂土密度控制試驗之結果，水中土壤之平均相對密度為 23.2%，標準差為 7.0%，上述土壤符合台灣西部風力發電計劃區海床砂土相對密度  $D_r = 15 \sim 46\%$  之要求。

## 5.4 Spudcan 垂直加載試驗結果

在完成各項前置作業，如在壓克力視窗標示，鋪設潤滑層，以水中沉降法備製土壤，並進行除氣作業後，本研究進行 spudcan 於飽和土層進行垂直加載，本節說明初步試驗成果。

### 5.4.1 土壤位移與破壞模式

圖 5-18 顯示，於 spudcan 貫入前，先備製 900 mm 長、450 mm 寬，900 mm 高之飽和渥太華砂試體。為探討 spudcan 貫入土層之極限承载力及其破壞模式，本研究進行 spudcan 垂直加載試驗，將直徑 300 mm 之 half-spudcan 以 0.66 mm/s 之速率貫入土層約 250 mm。以下以圖片說明貫入量達 100 及 250 mm，土壤各

點之位移及破壞模式，並與 Vesic(1973)，Lu(2007)建議之破壞模式相互比較。

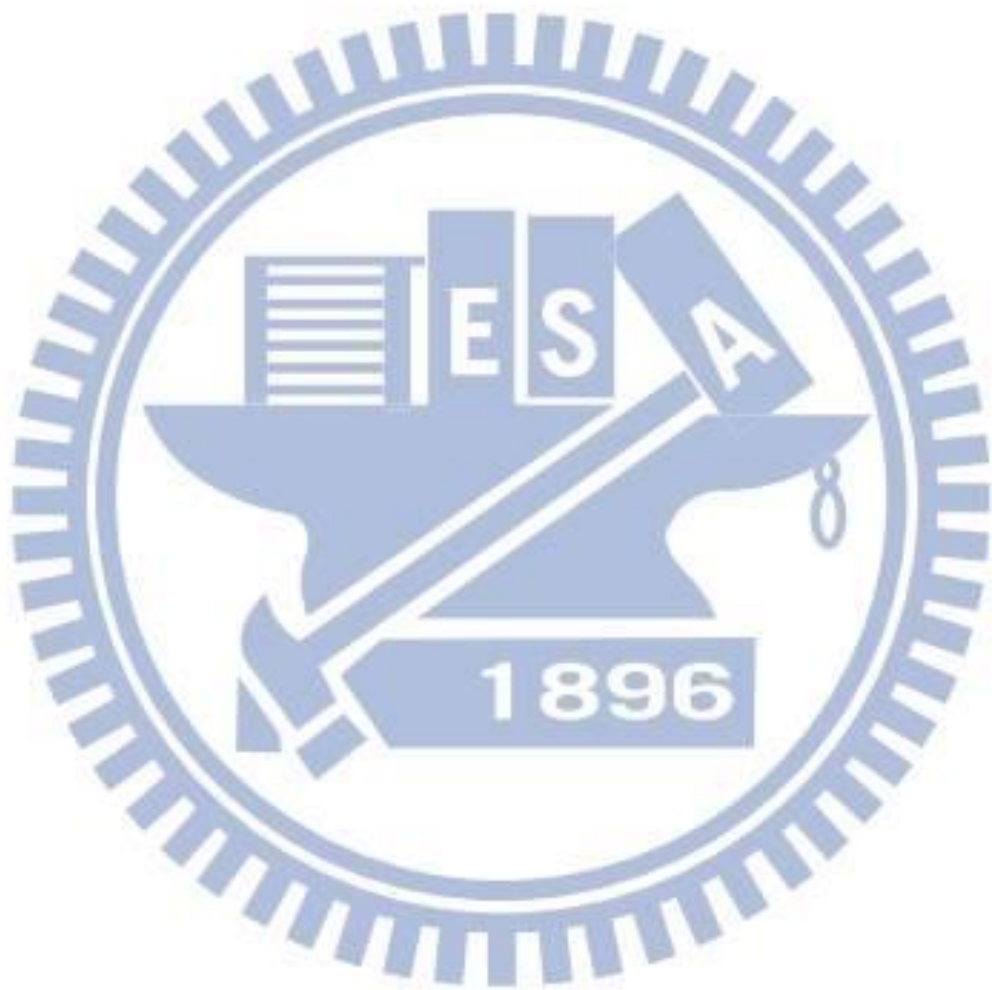
圖 5-19 顯示，以 spudcan 腳掌的下側斜面與底部圓錐體的交界處接觸土壤時為沉陷起始點。圖 5-20 (a)顯示，spudcan 貫入土壤 30 mm 照片，5-20(b)為 spudcan 貫入土壤 50 mm 照片。圖 5-21 spudcan 貫入達 100 mm 時之照片。圖 5-22(a)顯示，Vesic (1973)說明當土壤相對密度小於 35%，土壤受到荷重加載發生 punching shear failure，此種情況下土壤的破壞面不會延伸到地表面，如圖 5-22(b)所示，比較實驗結果，以水中沉降法備製之砂土試體，平均相對密度為 23.2 %，spudcan 貫入土層 100 mm 時，spudcan 下方砂土產生位移，但破壞面並無發展到表面，符合 Vesic(1973) punching shear failure。圖 5-23 顯示 spudcan 貫入土壤 150 mm 照片，圖 5-24(a)顯示，spudcan 貫入土層 250 mm 時之照片，圖 5-24(b)說明，Lu (2007)以離心機試驗所呈現之破壞模式，當 spudcan 貫入 1D 時，土壤破壞面由 spudcan 逐漸向外延伸，最後延伸到 spudcan 上方。比較實驗結果，當 spudcan 貫入達 250 mm 時，spudcan 下方土層產生大量垂直變位，上方土層填補 spudcan 貫入後所留下之孔隙。

#### 5.4.2 Spudcan 載重與沉陷關係

根據 Vesic(1963)相對密度與載重關係圖(圖 5-22(a)所示)，以水中實降法備製出飽和疏鬆砂土相對密度平均值為 23.2 %，屬於 punching shear 範圍，依據圖中之關係  $2q_u / \gamma B = 31$ ， $B = 0.3 \text{ m}$ 、 $\gamma = 15.4 \text{ kN/m}^3$  可以得到極限承载力為  $q_u = 71.6 \text{ kN/m}^2$ ， $Q_u = 2.53 \text{ kN}$ 。依據 Vesic(1963)相對密度與沉陷量關係(圖 5-25 所示)，當相對密度為 23.2 % 時，所對應之  $S/B = 14\%$ ，spudcan 直徑 300 mm，換算出來在極限承载力狀況之沉陷量為 42 mm。

圖 5-26 顯示，half-spudcan 載重與位移關係圖，在荷重加載初期(0.127 kN)，土壤隨即產生大幅度之位移約 30 mm，研判應是 spudcan 下側盤體(厚 29.2 mm)逐漸接觸土層而產生的壓力增加，如圖 5-27 所示。依據上述 Vesic(1963)理論，當極限承载力為 2.53 kN 時，所對應之沉陷量為  $30 + 42 = 72 \text{ mm}$ ，其中 30 mm 為下側盤體接觸土壤所造成之沉陷，與實驗結果相比，當沉陷量為 100 mm 時，所

對應之荷重為 2.57 kN 與依 Vesic(1963)圖 5-23(a)求出之極限支承力  $Q_u = 2.53 \text{ kN}$  相近。圖 5-28 顯示, spudcan 載重與沉陷量關係, 當  $S/D = 14\%$  時, 所對應之 spudcan 載為 2.57 kN 與 Vesic 理論相符合。



# 第六章

## 結論

本研究以實驗方法探討 spudcan 承受垂直荷重，在飽和疏鬆砂土造成之破壞機制，得到以下結論

- (1) 台灣電力公司(2009)對彰化離岸風力發電區進行地質鑽探、現場試驗，得到彰化離岸風力計畫區海床表面至 12 m 深度砂土之 SPT-N 值大約介於 7 ~ 21 之間，其相對密度介於  $D_r = 15 \sim 46\%$ 。
- (2) 以水中賈降法備製砂土試體，不論砂土顆粒通過 10 號或 20 號篩網，砂土試體之相對密度，皆隨砂土在水中沉降落距之增加而加大。若欲形成相對密度為 15 ~ 46% 之試體，可以優先考慮使用 200 mm 之沉降落距。10 號篩網開口尺寸 2 mm 明顯大於 20 號篩開口尺寸 0.85 mm，因此使用 10 號篩網在水中賈降砂土之作業速率明顯較快，可以優先考慮使用。
- (3) Vesic (1973) 說明當土壤相對密度小於 35%，土壤受到荷重加載發生 punching shear failure，此種情況下土壤的破壞面不會延伸到地表面，比較實驗結果，以水中沉降落法備製之砂土試體，平均相對密度為 23.2%，spudcan 貫入土層 100 mm 時，spudcan 下方砂土產生位移，但破壞面並無發展到表面，符合 Vesic(1973) punching shear failure。
- (4) 根據 Vesic(1963)相對密度與載重關係圖，依據圖中之關係可以得到極限承载力為  $q_u = 71.6 \text{ kN/m}^2$ ， $Q_u = 2.53 \text{ kN}$ 。當極限承载力  $Q_u$  為 2.53 kN 時，所對應之沉陷量為  $30 + 42 = 72 \text{ mm}$ ，與實驗結果相比，當沉陷量為 100 mm 時，所對應之荷重為 2.57 kN 與依 Vesic(1963) 求出之極限承载力  $Q_u = 2.53 \text{ kN}$  相近



## 參考文獻

1. 朱正男(2012)，“加速綠能產業起飛，政府擴大再生能源推動目標”，能源報導，2012年1月份。
2. 呂威賢(2012)，“海域風力發電應用與發展趨勢”，工業技術研究院。
3. 林大惠(2010)，“先導型離岸風電設置評估與規劃計畫構想書”，能源國家型科技計畫離岸風力主軸計畫，國家科學委員會。
4. 陳芙靜(2013)，“2012年歐洲離岸風力發電產業回顧與展望”，經濟部技術處產業技術知識服務計畫書，IT IS計畫成果。
5. 游啟聰(2008)，“台灣風力發電發展現況與未來”，工業技術研究院。
6. 楊昌中(2012)，“能源危機與永續發展”，工業技術研究院。
7. 經濟部工業局(2012)，“風力發電產業發展策略與措施”。
8. 經濟部技術處(2010)，“前瞻全球離岸風力發電技術與台灣產業機會分析”。
9. 經濟部能源局(2009)，“再生能源發展條例與台灣風力發電產業之發展”。
10. 經濟部能源局(2012)，“國際能源情勢與我國能源政策”。
11. 經濟部能源局(2011)，“能源統計手冊”。
12. 臺灣電力公司(2011)，“台電離岸風力發電規劃”。
13. 臺灣電力公司(2005)，“再生能源”，電源開發計畫。
14. 臺灣電力公司(2009)，“地質與水深地形測量調查報告”，彰化離岸風力發電可行性研究，附冊二。
15. 蔡明輝(2011)，“特殊海象離岸風力計畫之規劃、施工案例實習”，臺灣電力公司。
16. Chen, T. J., (2003). “Earth pressures due to vibratory compaction.” Ph.D. Thesis, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan.

17. Das, B. M., (2010). *Principals of foundation engineering*, 7th Ed., Cengage Learning, Stamford, CT, USA.
18. Gaudin, C., Cassidy, M.J., Bienen, B., Hossain, M.S. (2011), "Recent contributions of geotechnical centrifuge modelling to the understanding of jack-up spudcan behavior." *Ocean Engineering*, 38, 7, 900-914.
19. Health and safety Executive (2009). *Review of technical issues relating to foundations and geotechnics for offshore installations in the UKCS*. London, HSE books.
20. Holtz, R.D. and Kovacs, W.D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J.
21. Hossain, M.S., Hu, Y., Randolph, M.F. and White, D.J. (2005). "Limiting cavity depth for spudcan foundations penetrating clay." *Geotechnique*, 55(9), 679-690.
22. Lu, T.K. (2007). "Punch-through of spudcan foundation in sand overlying clay." Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, National University of Singapore.
23. Qiu, G and Henke, S. (2011). "Controlled installation of spudcan foundations on loose sand overlying weak clay." *Marine Structures*, 24, 528-550.
24. SNAME (2008). "Guideline for site specific assessment of mobile jack-up units." The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin 5-5A, N.J.
25. Tatsuoka, F., and Haibara, O., "Shear resistance between sand and smooth or lubricated surface." *Soil Foundations*, Vol. 25, No.1, Mar.,1985, 89-98.
26. Terzaghi K. (1943). "Theoretical soil mechanics." John Wiley and Sons, Hoboken, N.J.
27. Tjahyono, S. (2011). "Experimental and numerical modelling of spudcan penetration in stiff clay overlying soft clay." Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, National University of Singapore.
28. Vesic, A.S., (1973). "Analysis of ultimate loads of shallow foundations." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 99(1), 45-73.

29. Vesic, A.S.,(1963). “Bearing capacity of deep foundations in sand,” Highway Research Record NO.39, National Academy of Sciences, 112-153.
30. World Wind Energy Association WWEA (2011). “World wind energy report 2010 .” Cairo, Egypt.

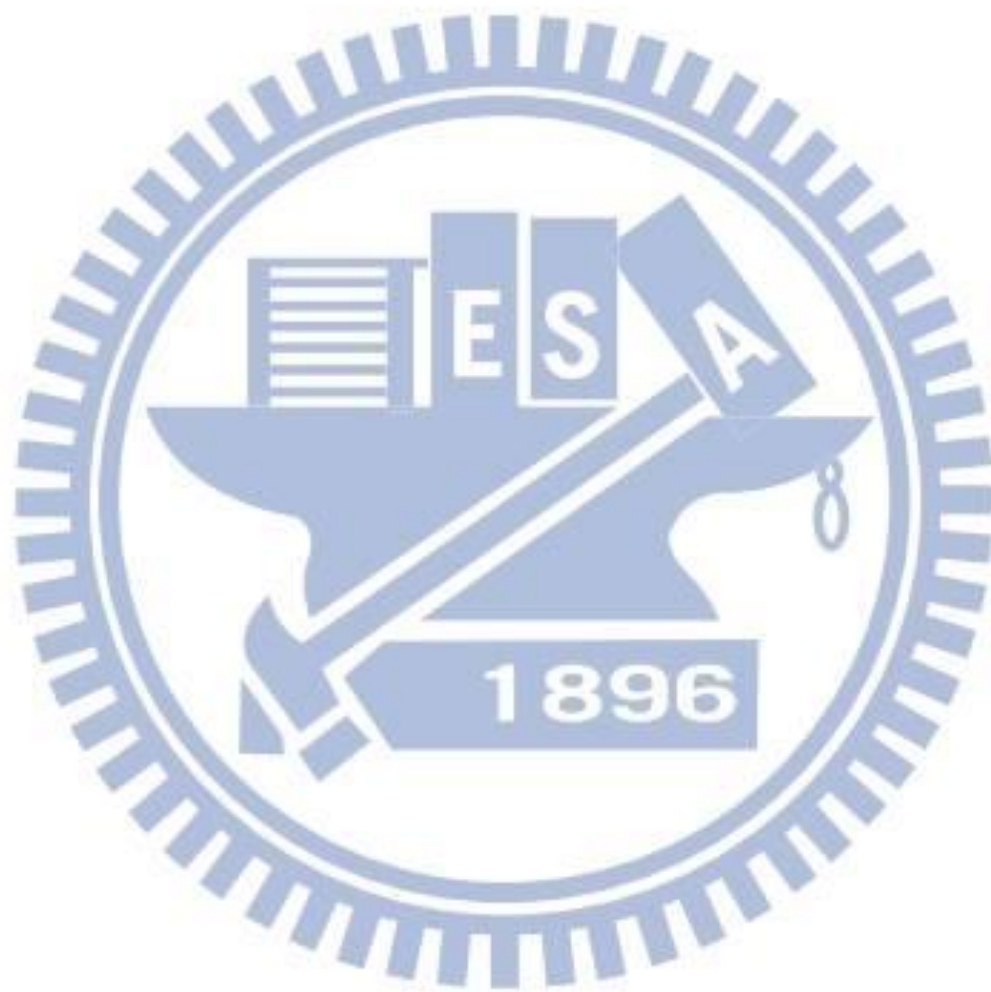


表 2-1 重力式、單樁式、三腳式離岸風機基礎優缺點(摘自呂威賢 2012)

基礎型式	優點	缺點
重力式基礎	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.適用於淺海地區(5公尺水深以下)·亦可使用於20公尺深海域但是價格昂貴</li> <li>2.可於岸上先行製造基礎</li> <li>3.機座穩固</li> <li>4.價格便宜</li> <li>5.不需鑽孔或打基樁</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.海床需整地</li> <li>2.基礎需進行防沖蝕保護</li> <li>3.基礎重量過重需大型運輸吊船</li> <li>4.現場需較大之工作面積範圍及空間</li> <li>5.需考量土壤液化問題</li> <li>6.大型運輸吊裝船工作運輸路線需先疏竣</li> </ol>
單樁式基礎	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.適用於海域地區(5公尺~15公尺水深)</li> <li>2.基礎構造簡單且易於製造</li> <li>3.價格便宜</li> <li>4.不需整理海床但需有防蝕措施</li> <li>5.不受土壤液化影響</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.基礎需進行防沖蝕保護</li> <li>2.遇岩盤需先鑽孔</li> <li>3.需大型運輸吊船吊裝</li> <li>4.需有一接續段Transition piece</li> <li>5.基樁深度因海底底床性質而不同</li> <li>6.吊裝船需有打樁設施</li> </ol>
三腳式基礎	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.適用於深海域地區(10公尺~20公尺水深)</li> <li>2.不需整理海床但需有防蝕措施</li> <li>3.不受海水沖蝕影響</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.製造不易</li> <li>2.現場需較大之工作面積範圍及空間</li> <li>3.水深過深較不易安裝</li> <li>4.價格較為昂貴</li> </ol>



表 3-1 UWA 及 NUS spudcan 試驗模型尺寸及角度表

Model	Author	Paper Title	$D_{sc}$ (mm)	$D_{leg}$ (mm)	$T_d$ (mm)	Hc (mm)	$\theta_c$ (°)	$\theta_{ui}$ (°)	$\theta_{li}$ (°)
1	Martin & Housby (UWA)	Combined loading of spudcan foundations on clay: laboratory tests(2000)	125		2.5		76	13	13
2	Hossain and Randolph (UWA)	Cavity Stability and Bearing Capacity of Spudcan Foundations on Clay(2006)	60	14.6	1.5	8.6	76	13	13
3	Lu (NUS)	Punch-through of spudcan foundation in sand overlying clay (2007)	30	7.3	0.75	4.3	76	13	13
4	Lu (NUS)	Punch-through of spudcan foundation in sand overlying clay (2008)	100	16	5		80	10	
5	Lu (NUS)	Punch-through of spudcan foundation in sand overlying clay (2009)	40	14.6	1.5	5.12			
6	Lu (NUS)	Punch-through of spudcan foundation in sand overlying clay (2010)	80	14.6	1.5	7			
7	Yi (NUS)	Centrifuge model study on spudcan-pile interaction(2009)	100	15	5	9	80	19	11
8	Yi (NUS)	Centrifuge model study on spudcan-pile interaction(2010)	140	13	6	15	70	29	16

表 4-1 彰化風力發電計畫區海床土壤室內試驗成果表

(資料摘自台灣電力公司 2009)

試驗種類	土壤分類	土壤性質	實驗獲得數值
直接剪力試驗 (DS test)	SM	有效應力摩擦角	$\phi' = 26.9^\circ \sim 33.6^\circ$
無圍壓縮試驗	CL	無圍壓縮強度	$q_u = 20.59 \sim 87.28 \text{ kN/m}^2$
單向度壓密	CL	壓縮指數	$C_c = 0.156 \sim 0.270$
三軸壓密 不排水 (CU test)	CL	總應力凝聚力	$C = 16.67 \sim 50.99 \text{ kN/m}^2$
		總應力抗剪角	$\phi = 11.6^\circ \sim 22.5^\circ$
		有效凝聚力	$C' = 0$
		有效抗剪角	$\phi' = 27.8^\circ \sim 33.7^\circ$
三軸壓密排水 (CD test)	SM	尖峰凝聚力	$C' = 0$
		尖峰抗剪角	$\phi' = 35.4^\circ \sim 36.9^\circ$

表 4-2 標準貫入試驗 N 值與砂土相對密度及內摩擦角之經驗關係

(摘自 Das 2010)

Standard penetration number, N	Approximate relative density (%)	Approximate angle of internal friction of soil (degree)
0~5	0~5	26~30
5~10	5~30	28~35
10~30	30~60	35~42
30~50	60~95	38~46

表 4-3 彰化離岸風力計畫區鑽孔深度與其 SPT-N 值  
(資料摘自台灣電力公司 2009)

Depth (m)	BH01	BH02	BH03	BH04	BH05	BH06	BH07	BH08	BH09
0~1.5	11	10	8	10	7	8	8	2	7
1.5~3.0	4	11	10	10	8	4	11	5	9
3.0~4.5	10	15	12	12	5	5	6	12	11
4.5~6.0	8	8	5	12	15	8	14	15	18
6.0~7.5	8	17	15	12	17	16	12	16	17
7.5~9.0	12	16	13	8	16	19	10	7	10
9.0~10.5	17	16	16	11	15	19	15	9	17
10.5~12.0	18	8	16	21	15	18	17	18	16
12.0~13.5	15	10	15	22	16	13	18	18	19
13.5~15.0	18	5	17	22	19	6	19	5	20
15.0~16.5	2	6	6	9	14	10	17	5	20
16.5~18.0	4	8	11	11	15	13	20	12	20

※註：紅色格(較深色灰階)為粉土質砂土(SM)

藍色格(較淺色灰階)為低塑性黏土(CL)

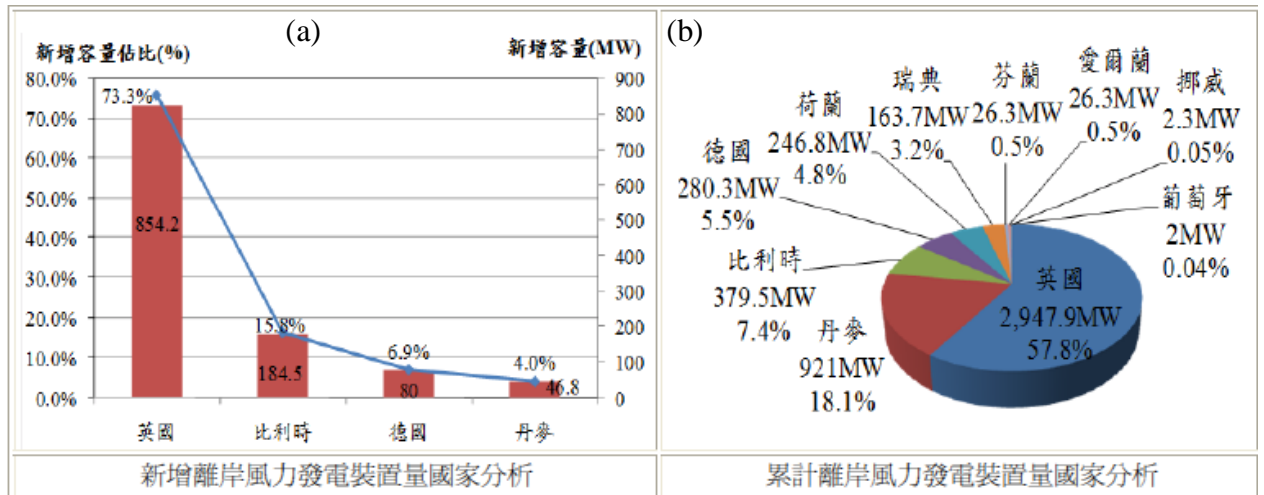


圖 1-1 2012 歐洲地區離岸風能發電裝置量比例(摘自陳芙靜 2012)







圖 1-2 自升式安裝平台船安裝離岸風機



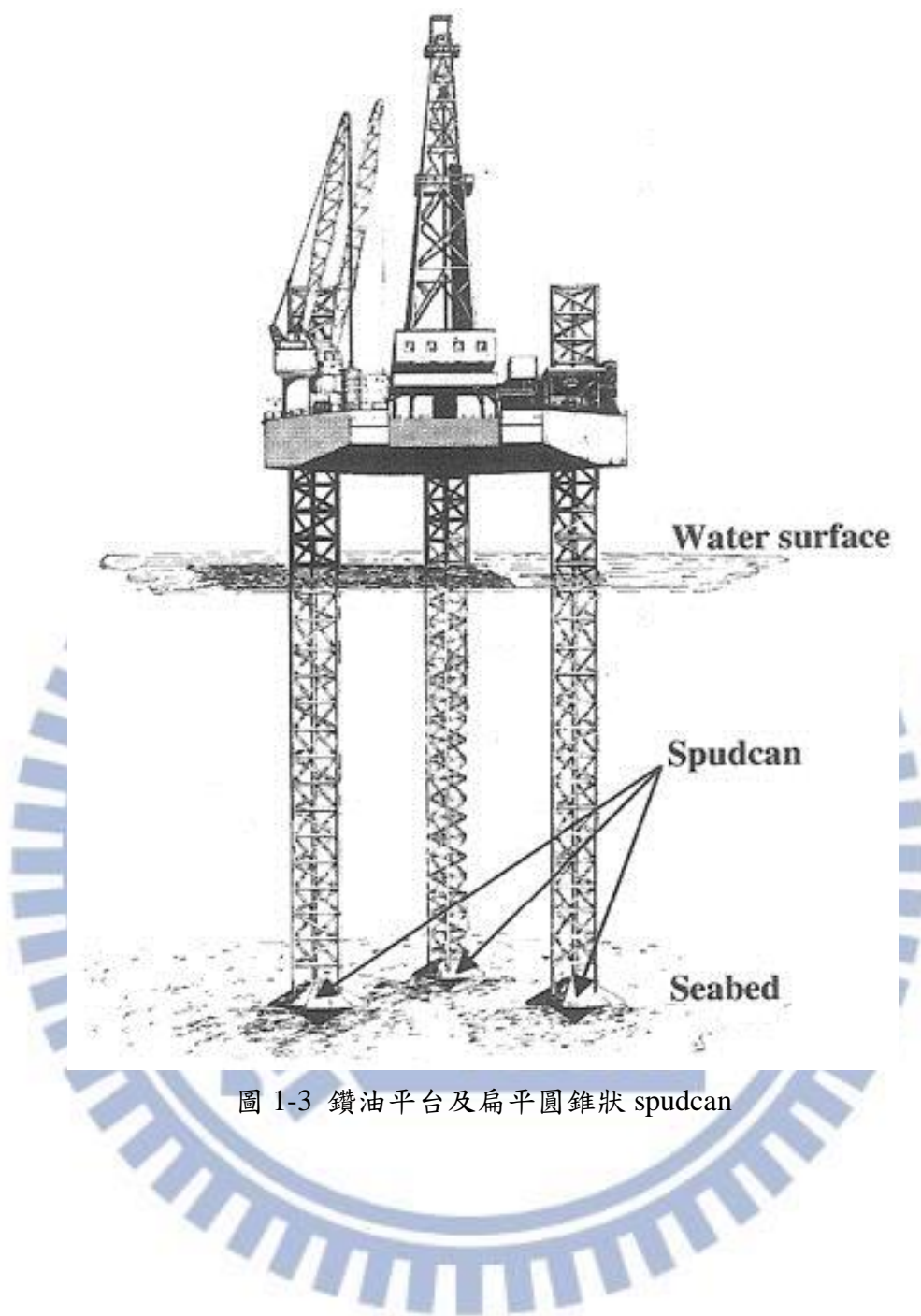


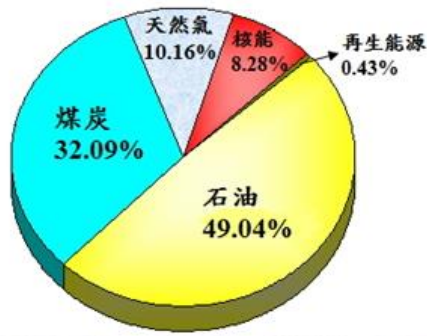
圖 1-3 鑽油平台及扁平圓錐狀 spudcan



圖 1-4 鑽油平台支撐腳發生貫穿式破壞



我國初級能源供給(2010)



(a)

我國自產能源(2010)



(b)

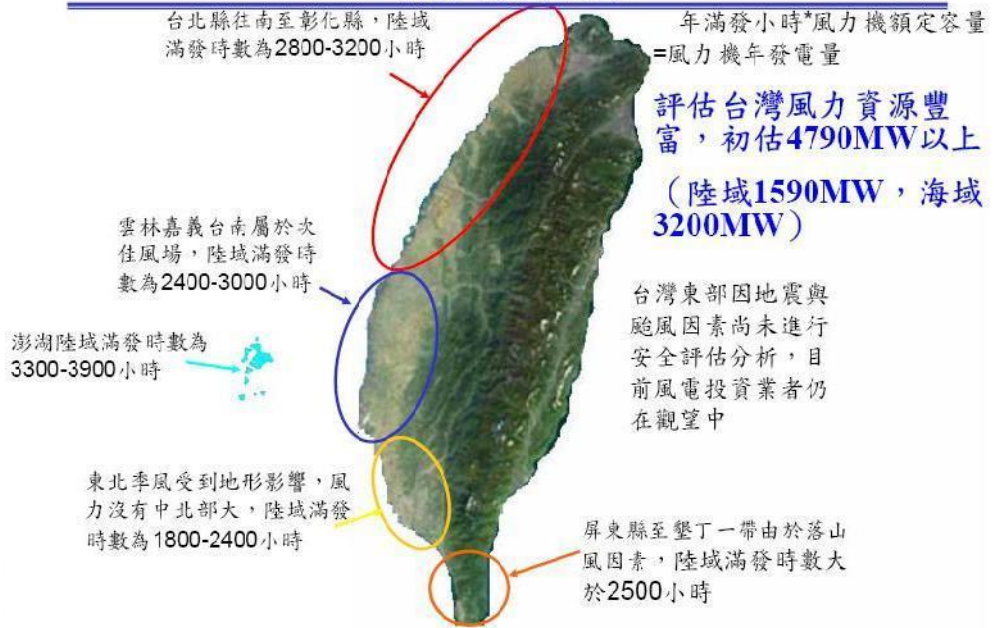
圖 2-1 我國 2010 年初級能源供給及自產能源比例

(摘自經濟部能源局, 能源統計手冊 2011)



圖 2-2 比利時海岸的北海 5MW 離岸風機

### 台灣風力產業發展現況 台灣風能的稟賦



資料來源：工研院能環所(2007/10)

Copyright 2007 ITRI: 工業技術研究院

圖 2-3 台灣風場調查(摘自工業技術研究院 2007)



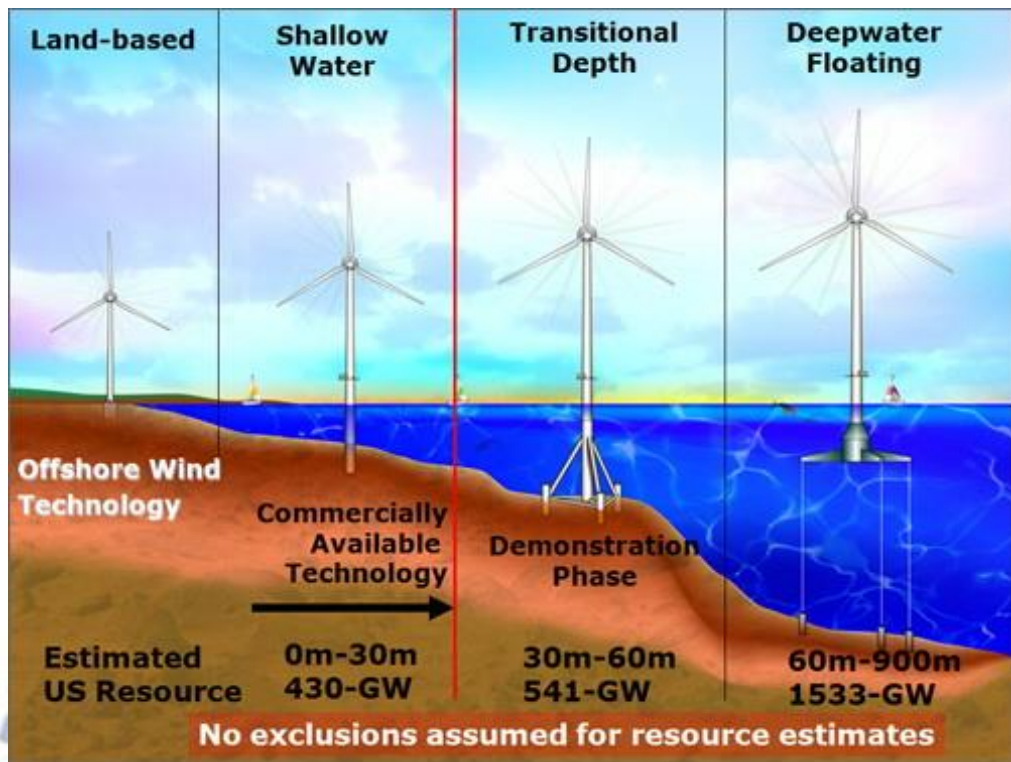


圖 2-4 不同深度海床的風機基礎型式(摘自 NREL National Renewable Energy Laboratory 2010)



圖 2-5 自升式平台船安裝離岸風機



圖 2-6 自升式安裝船支撐腳收縮至船身上方



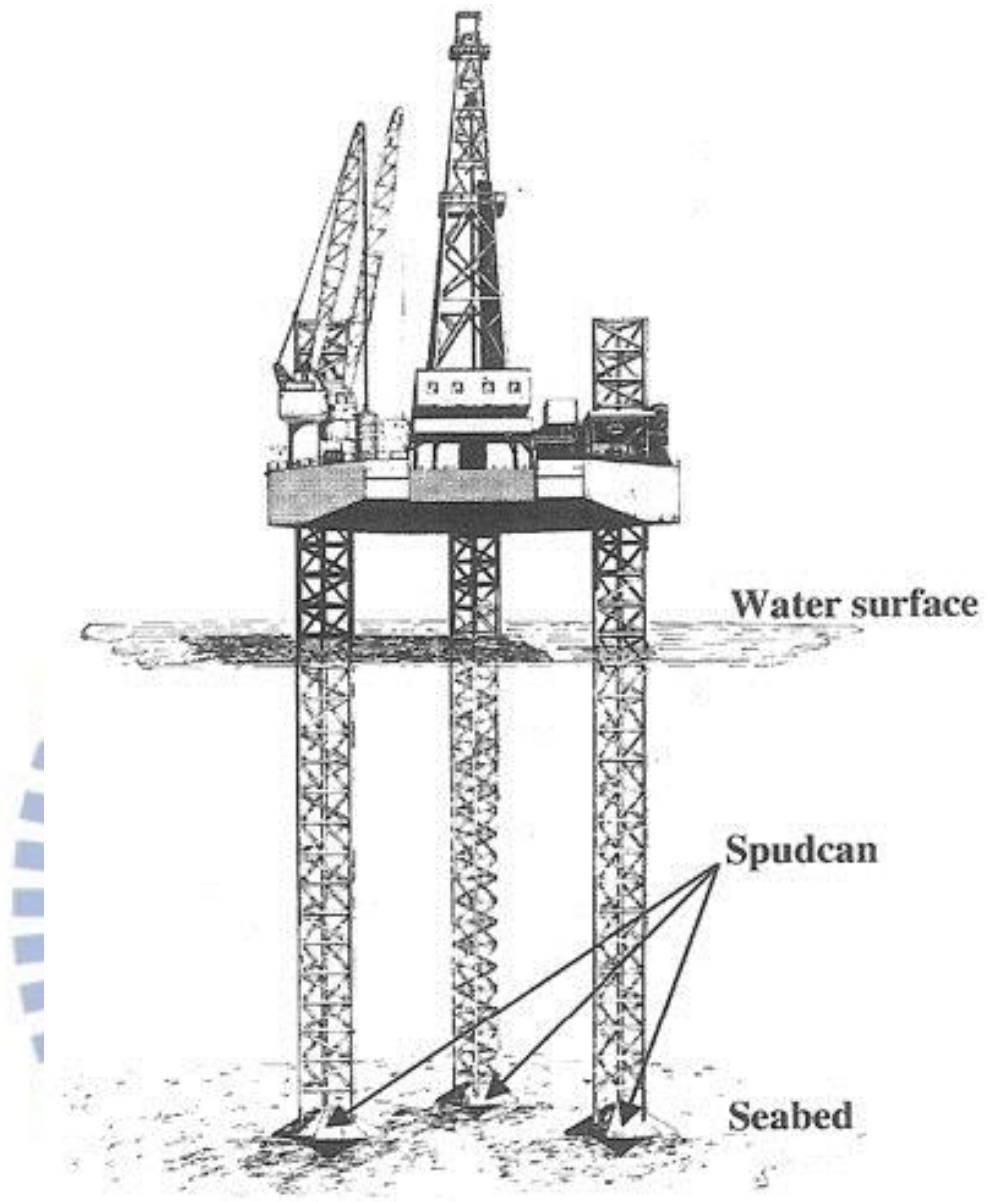


圖 2-7 自升式鑽油平台及 spudcan





圖2-8 基礎沖刷防護層級配料鋪設及基礎吊裝(摘自呂威賢 2012)

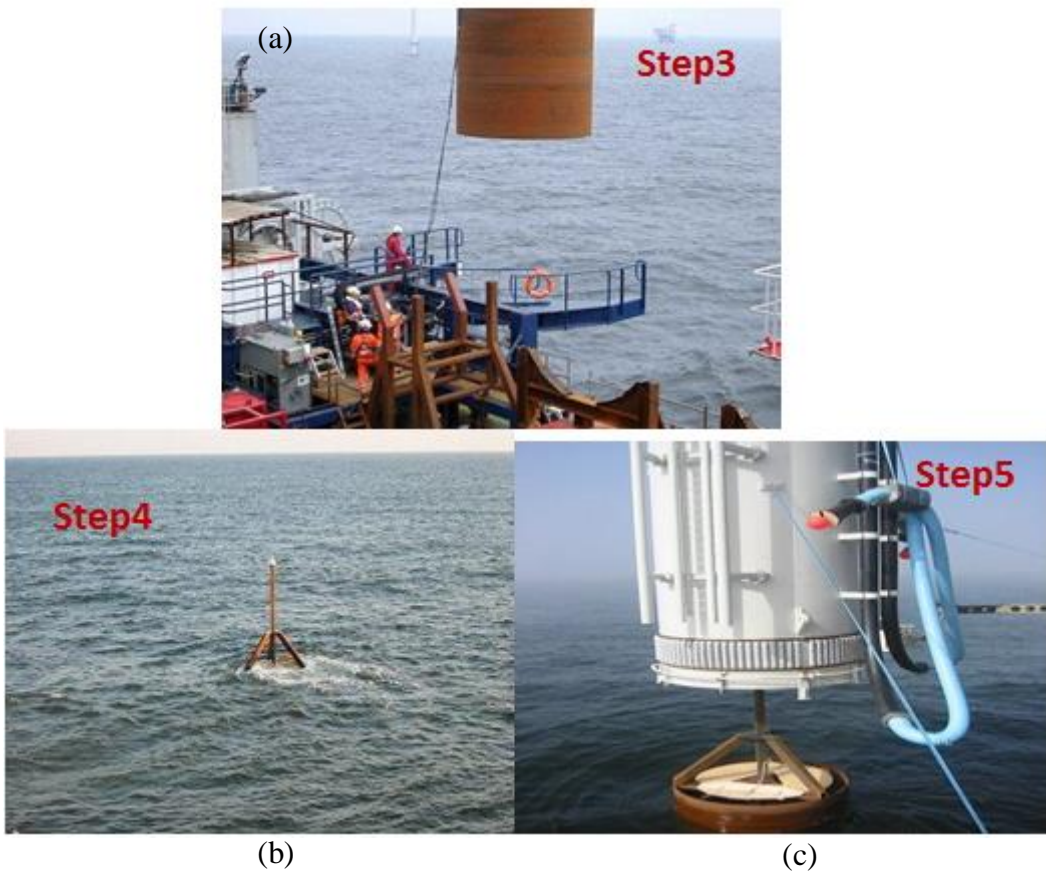


圖2-9 基樁定位及安裝與標轉換段安裝(摘自呂威賢 2012)



(a)



(b)

圖2-10 基礎沖刷防護塊石鋪設及安裝工作台(摘自呂威賢 2012)



(a)



(b)

圖2-11 風力機岸上整備及裝船整備(摘自呂威賢 2012)



(a)

(b)

圖2-12 風力機塔架上下段安裝(摘自呂威賢 2012)



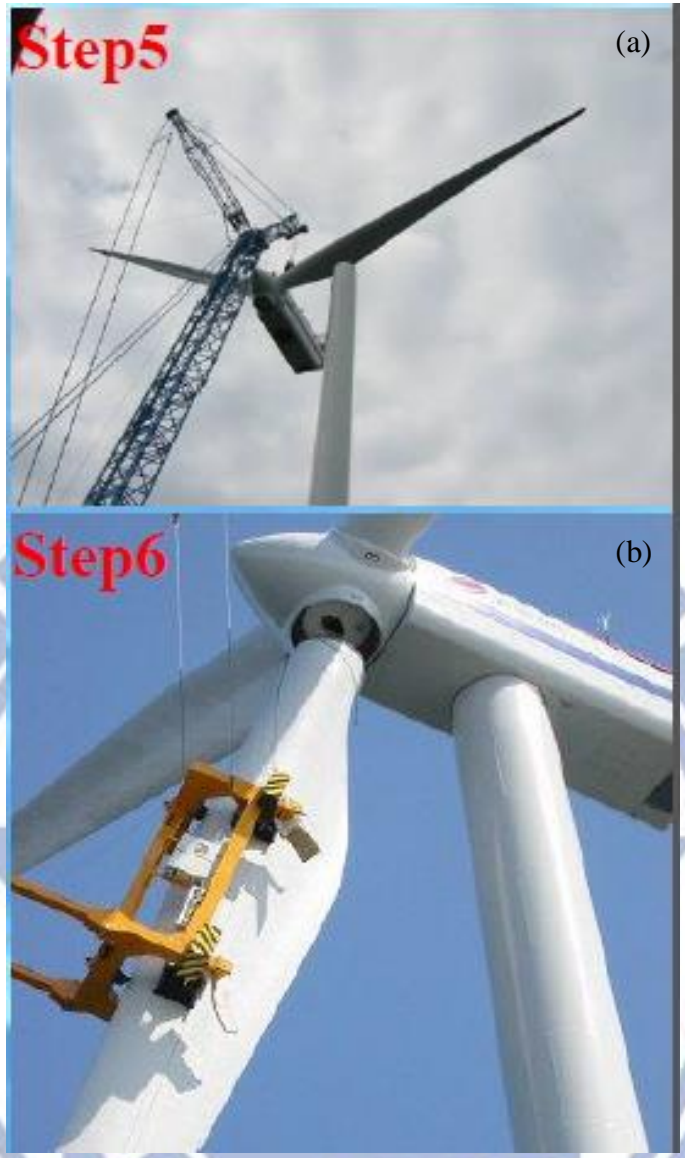


圖2-13 風力機葉片吊裝(摘自呂威賢 2012)



圖 2-14 鑽油平台之支撐基腳

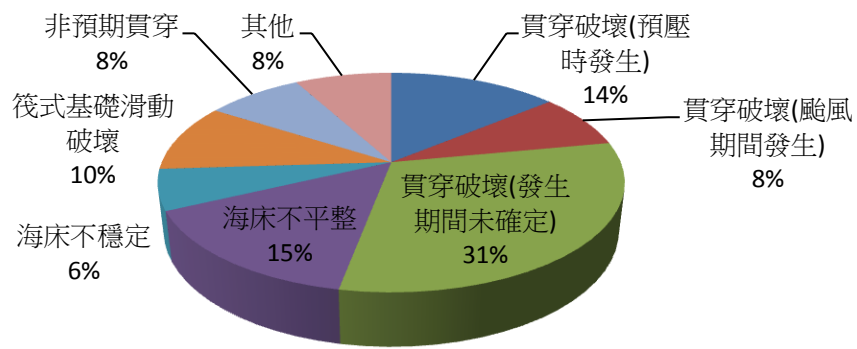


圖 2-15 Spudcan 破壞模式統計(摘自 Health & Safety Executive 2009 )



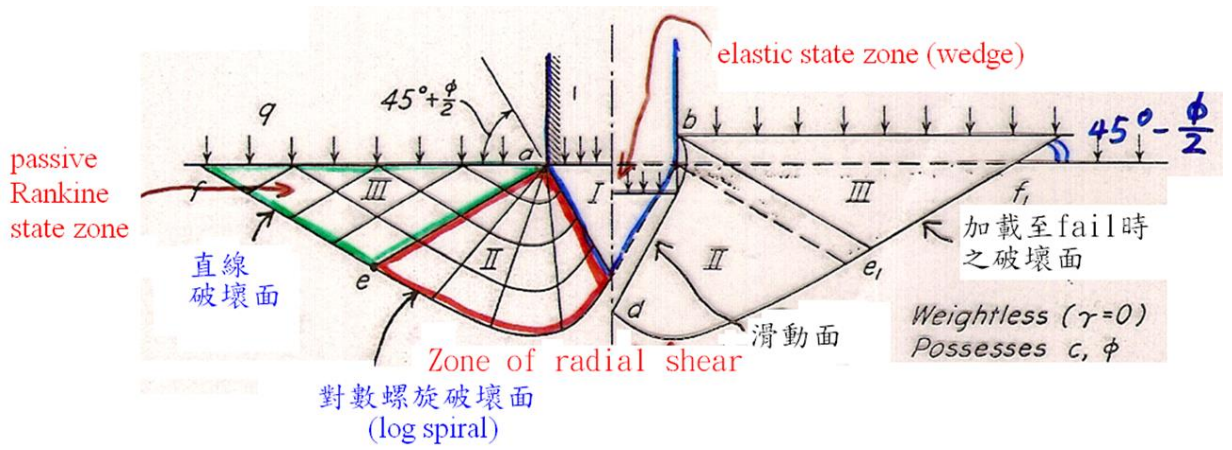


圖 2-19 條型基腳下的土壤支承力破壞模式(摘自 Terzaghi 1943)

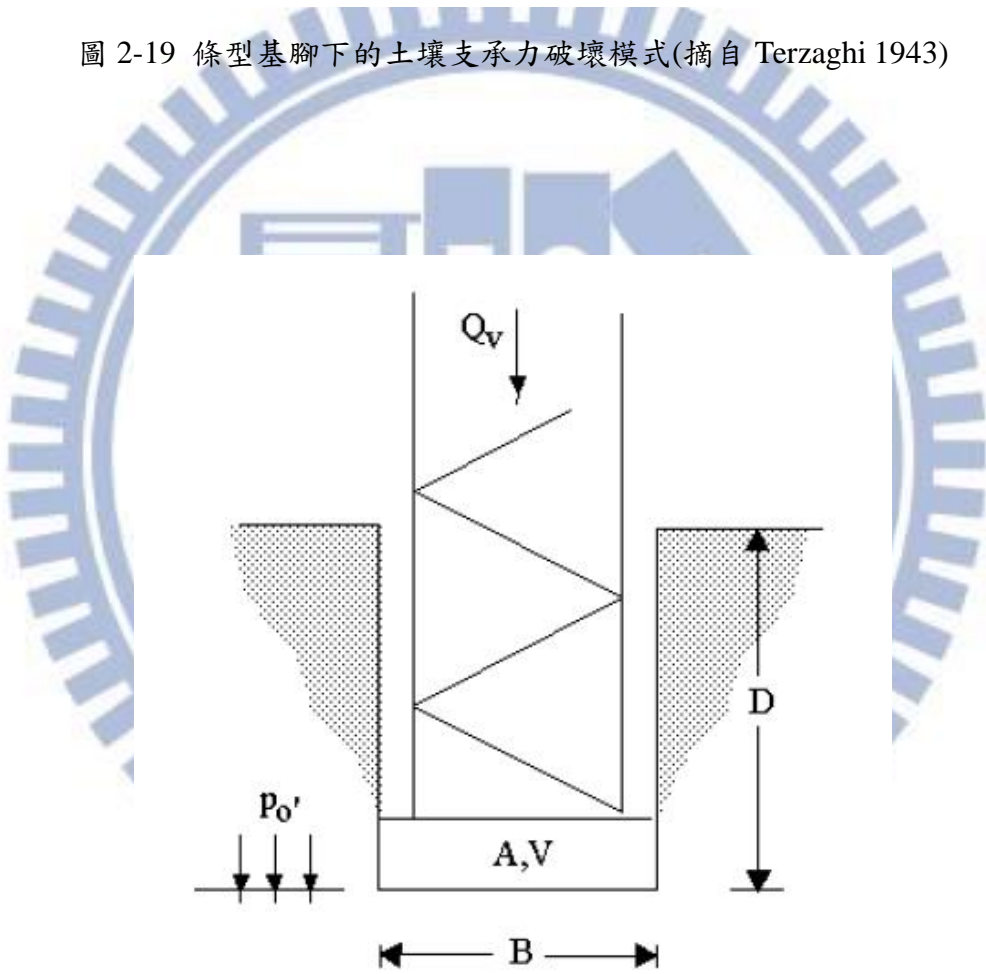
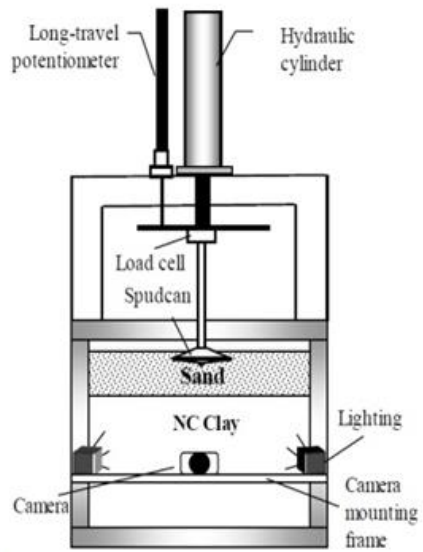


圖 2-20 基腳支承力分析(摘自 SNAME 2008)



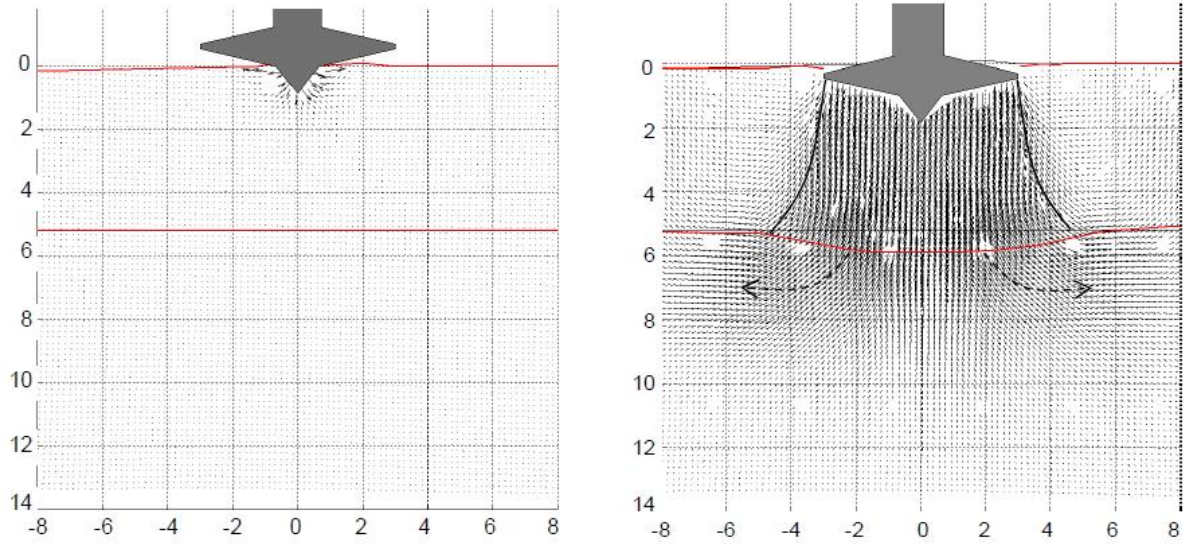
(a)

(b)

圖 2-21 NUS 離心機設備(摘自 Lu 2007)

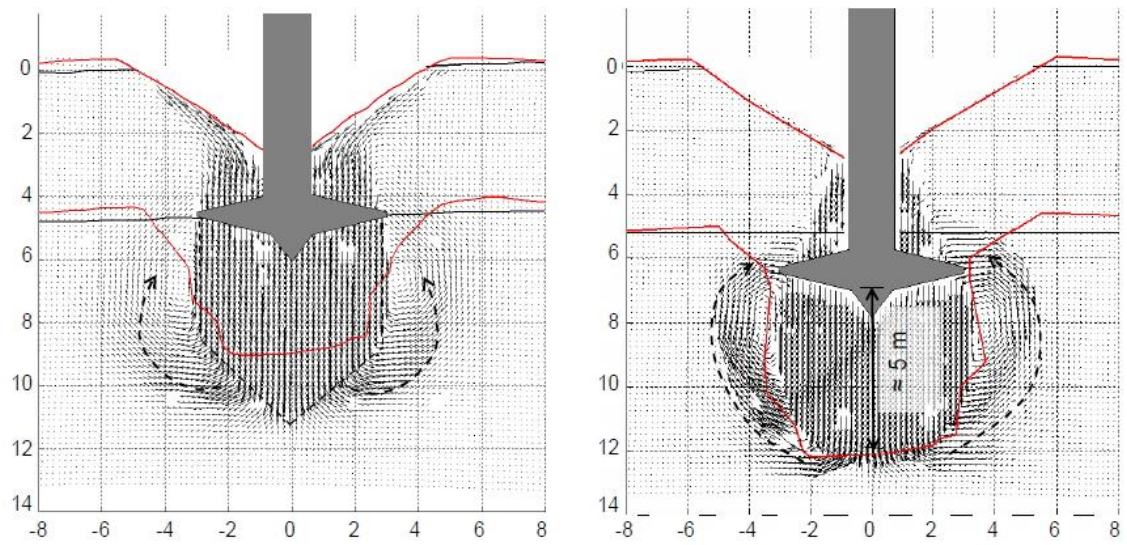






(a)

(b)



(c)

(d)

圖 2-22 NUS 離心機試驗結果(摘自 Lu 2007)

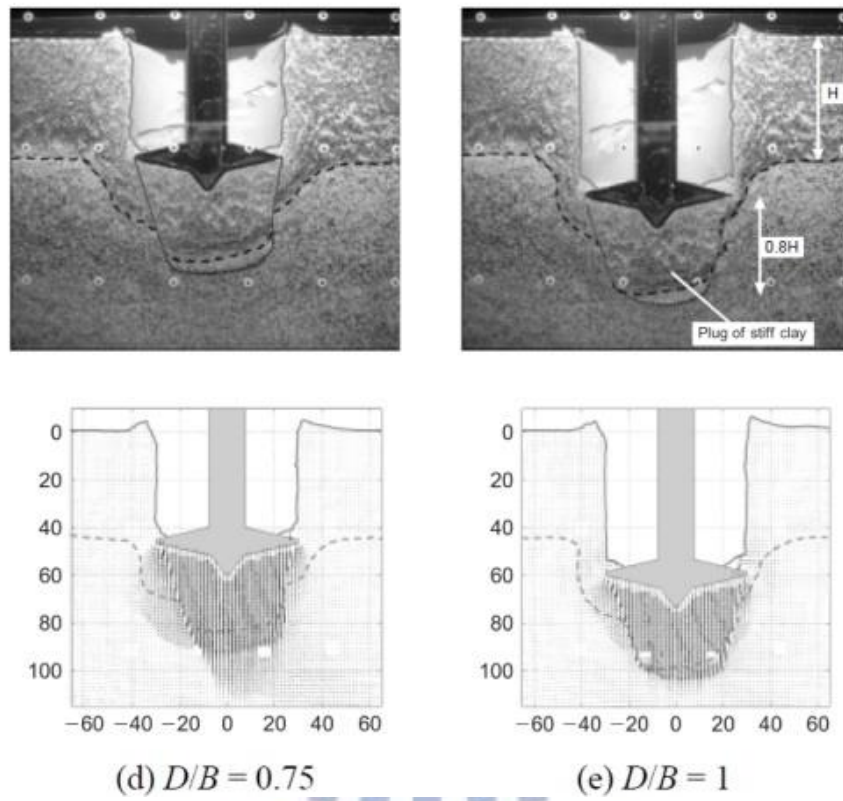
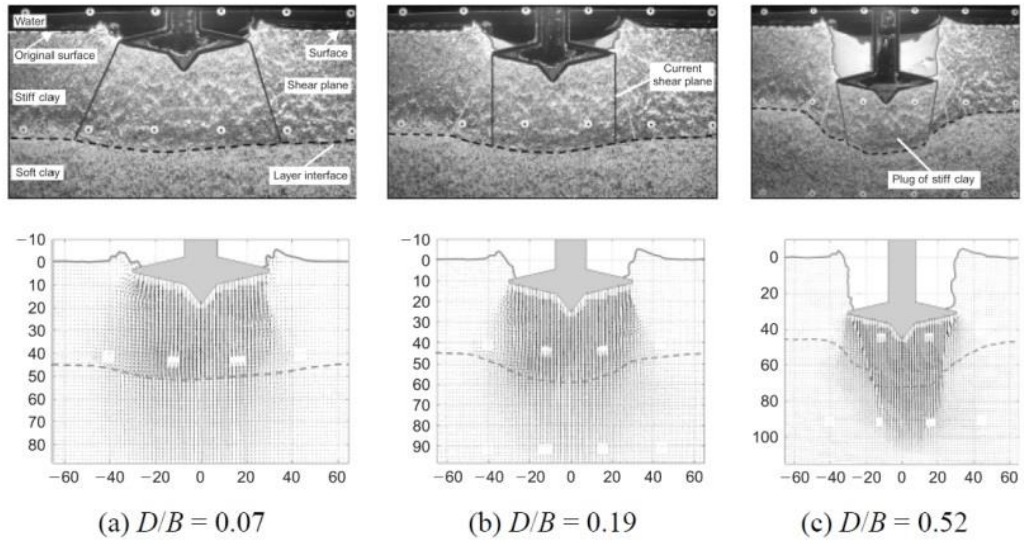
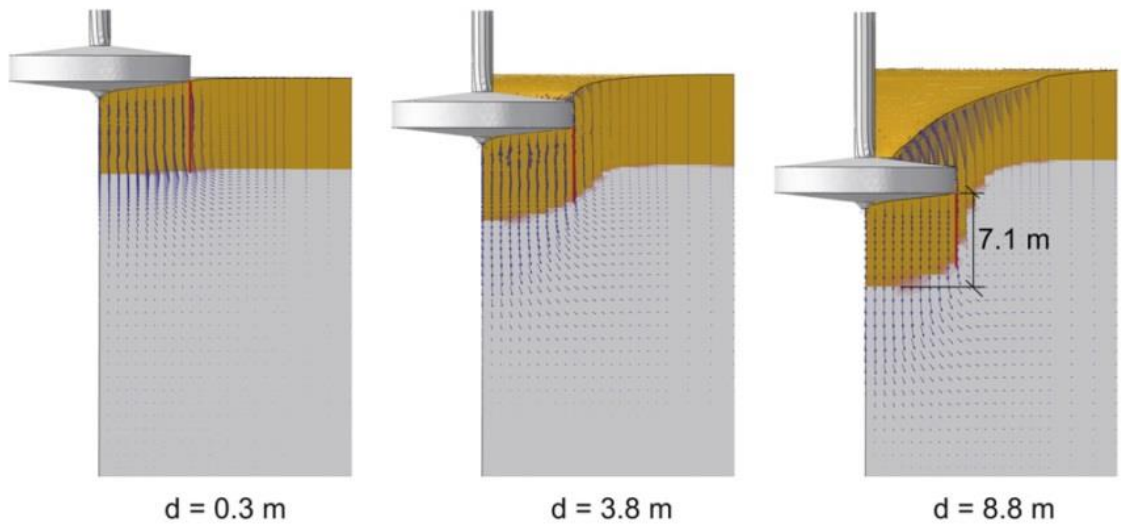


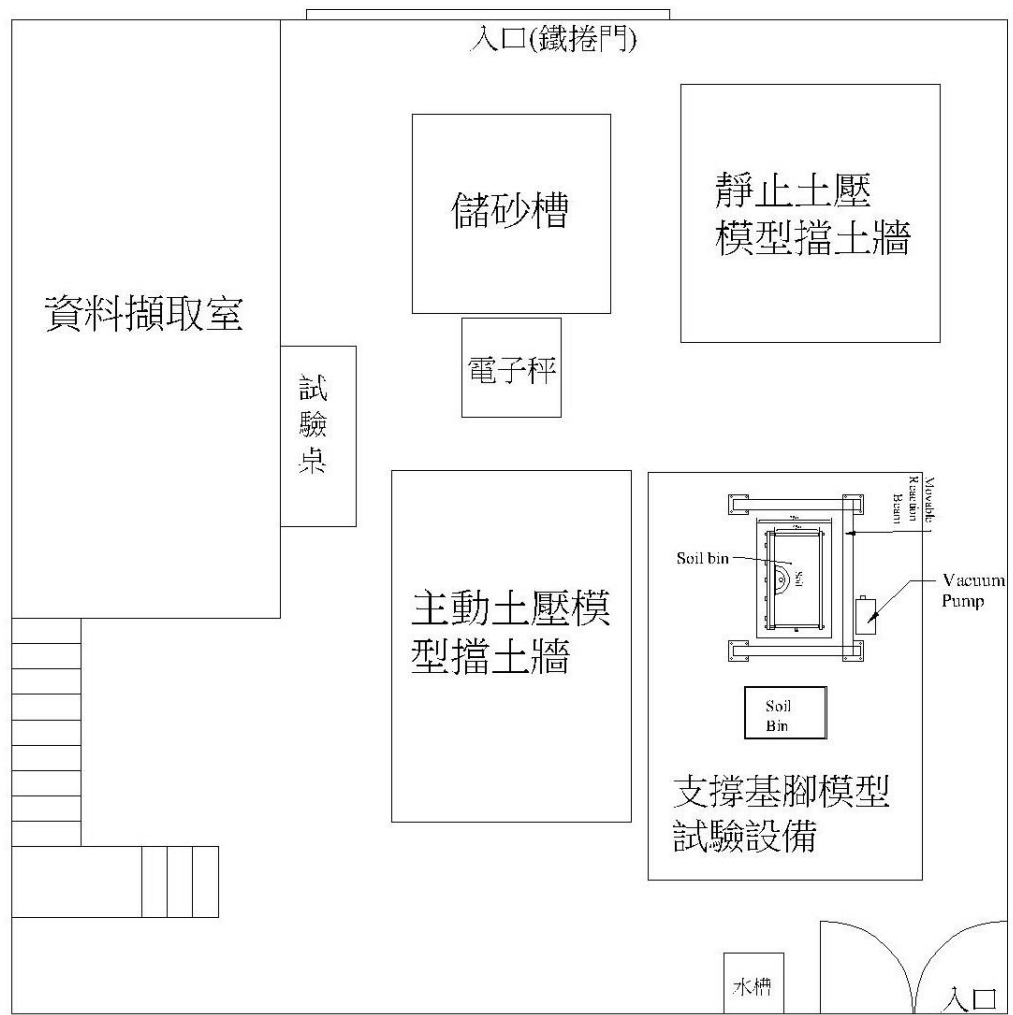
圖 2-23 UWA 離心機試驗結果(摘自 Hossain et al. 2010)



(a) (b) (c)

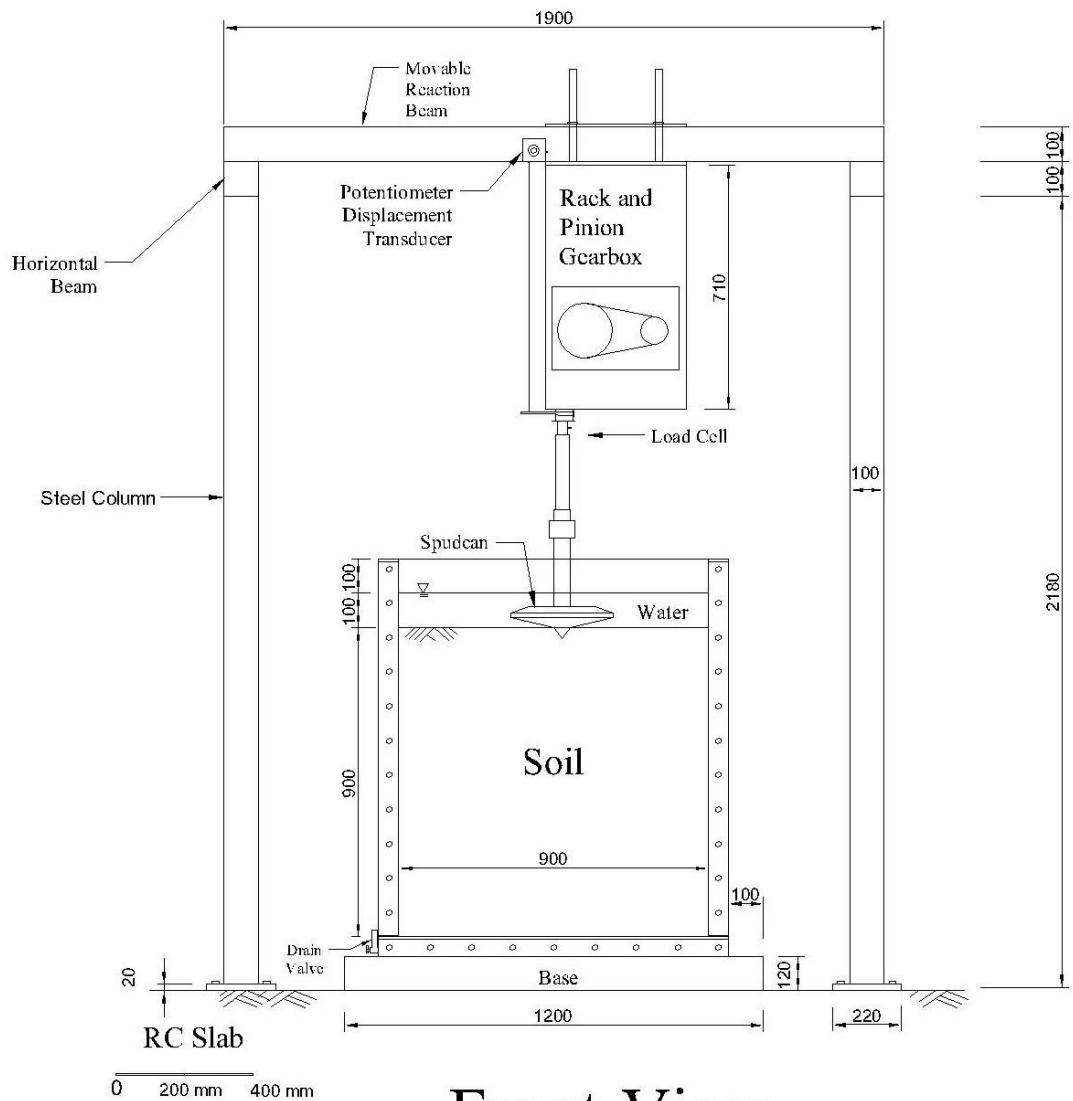
圖 2-24 數值模擬結果(摘自 Qiu and Henke 2011)





0 1 2 m

圖 3-1 交通大學基礎模型試驗室平面配置



Front-View Unit : mm

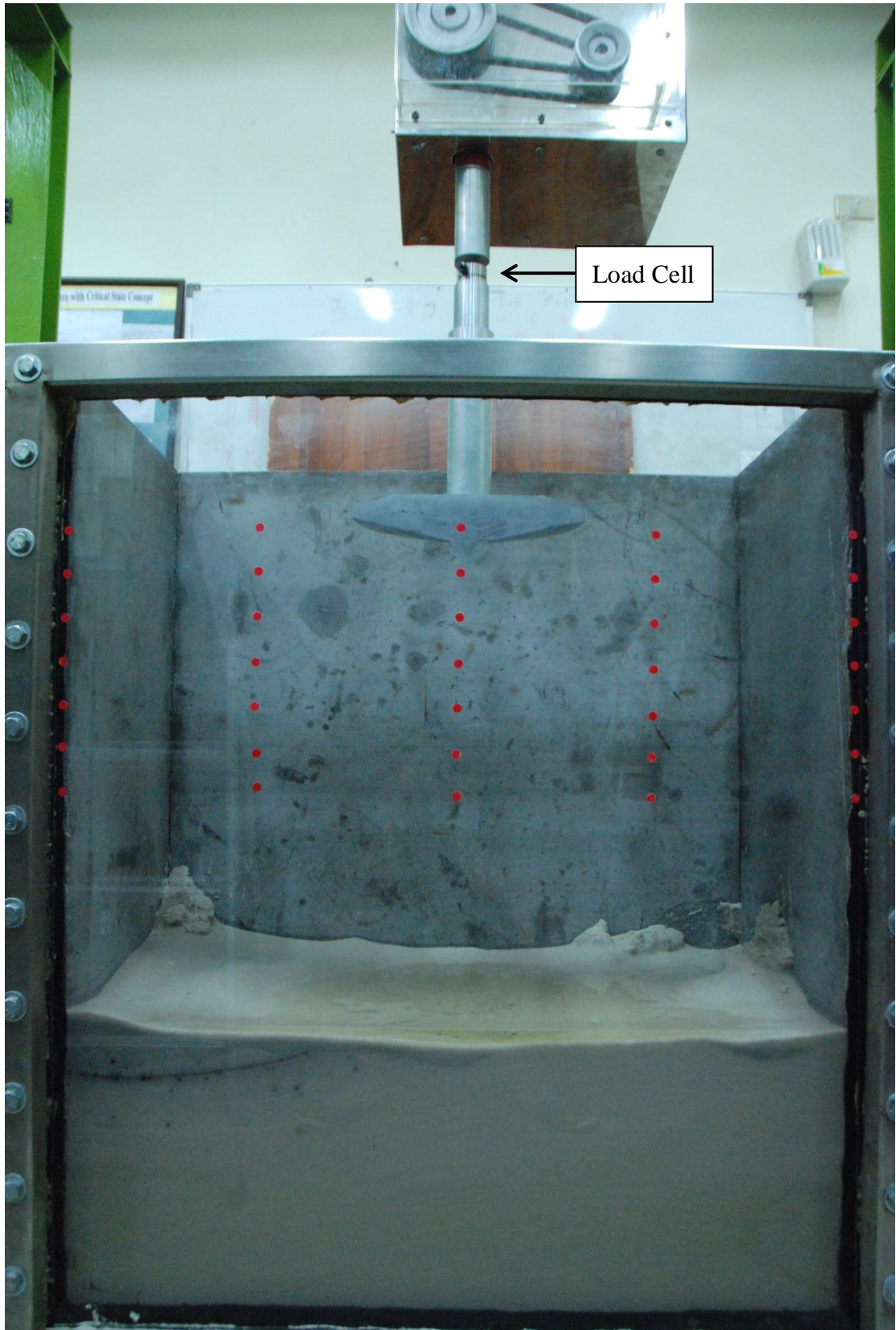
(a)

圖 3-2(a) 試驗土槽及 spudcan 垂直加載系統前視圖



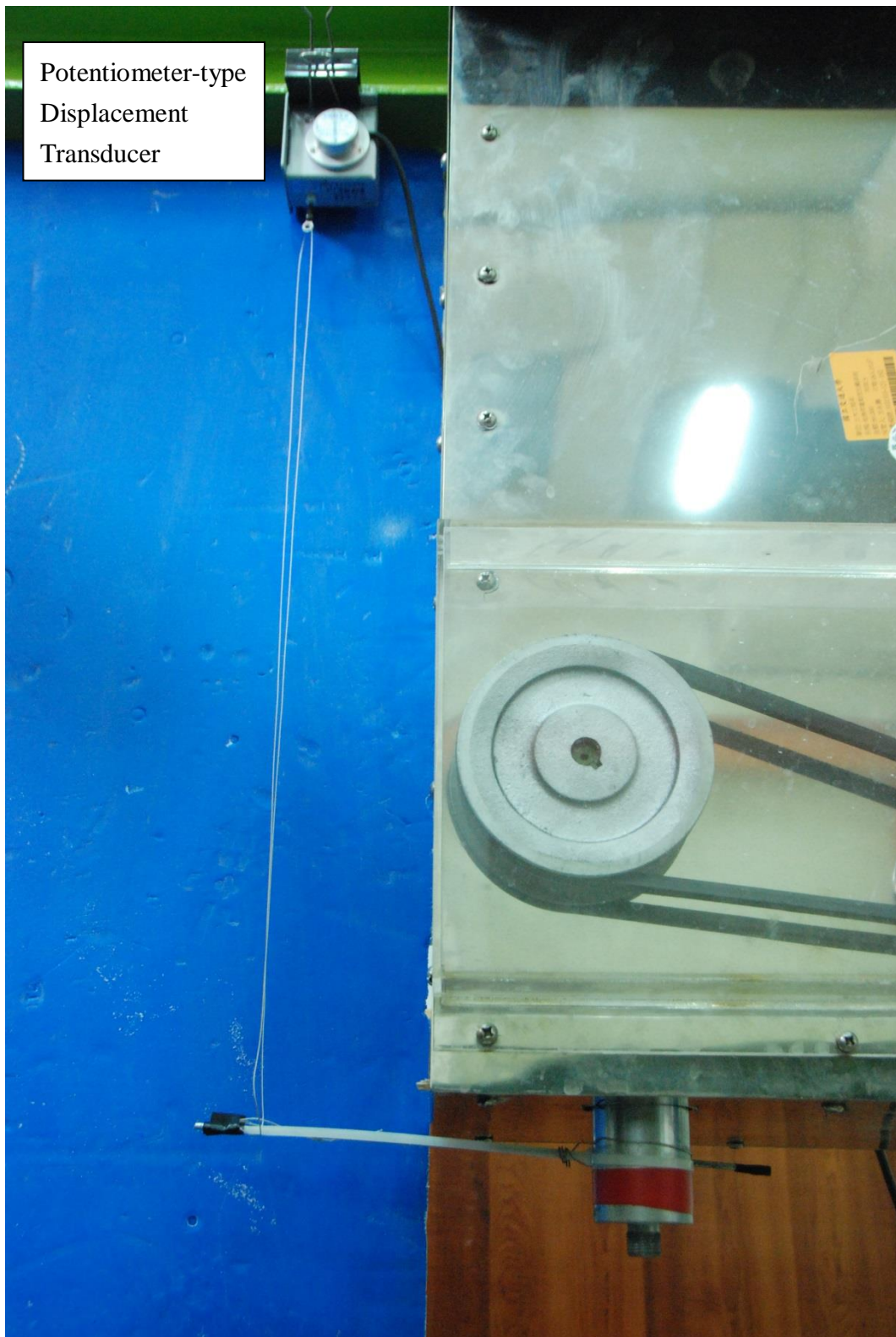
(b)

圖 3-2(b)反力架施工圖



(c)

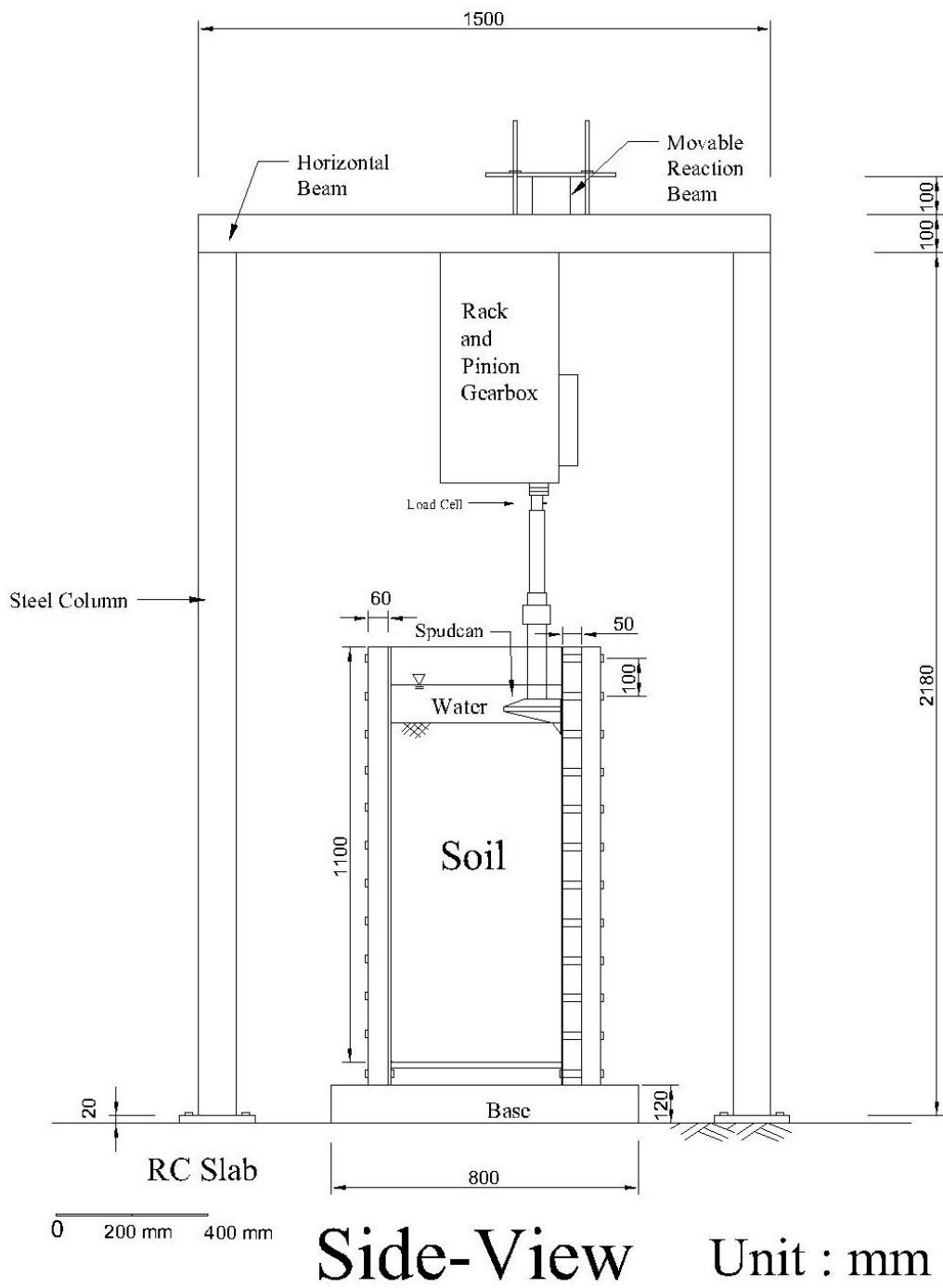
圖 3-2(c) 試驗土槽前視圖



(d)

圖 3-2(d) 位移計安裝位置





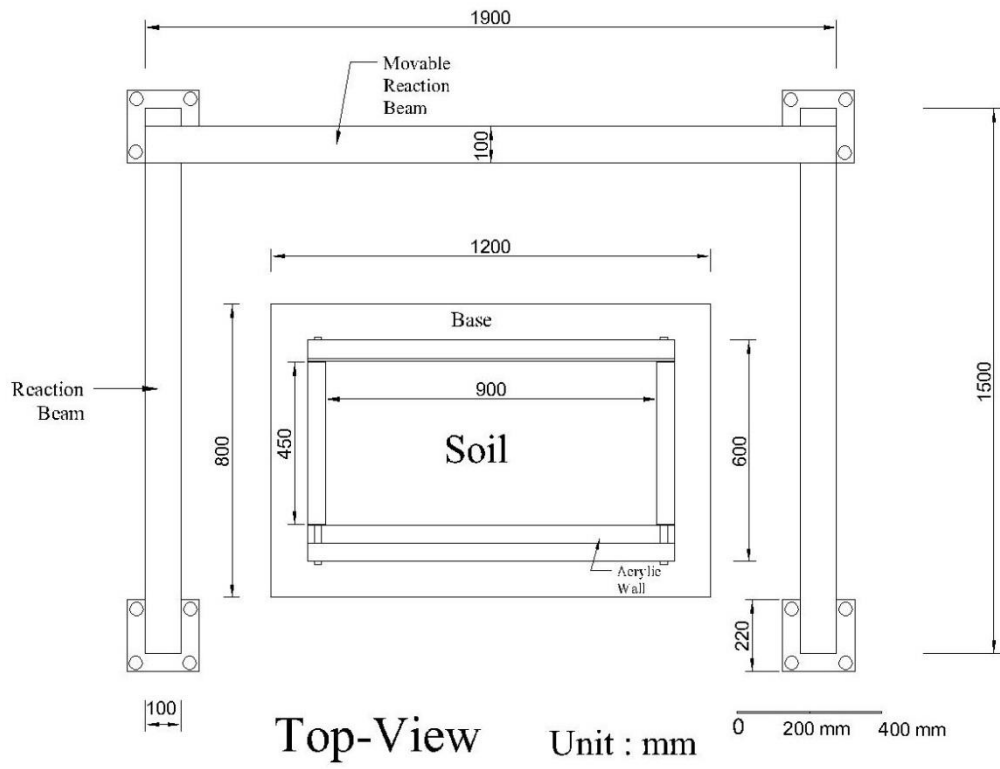
(a)

圖 3-3(a) 試驗土槽及 spudcan 垂直加載系統側視圖



(b)

圖 3-3(b) 試驗土槽及 spudcan 垂直加載系統側視圖



(a)



(b)

圖 3-4 試驗土槽及 spudcan 反力架頂視圖



圖 3-5 NUS 試驗土槽前視圖



圖 3-6 NUS 試驗土槽及 spudcan

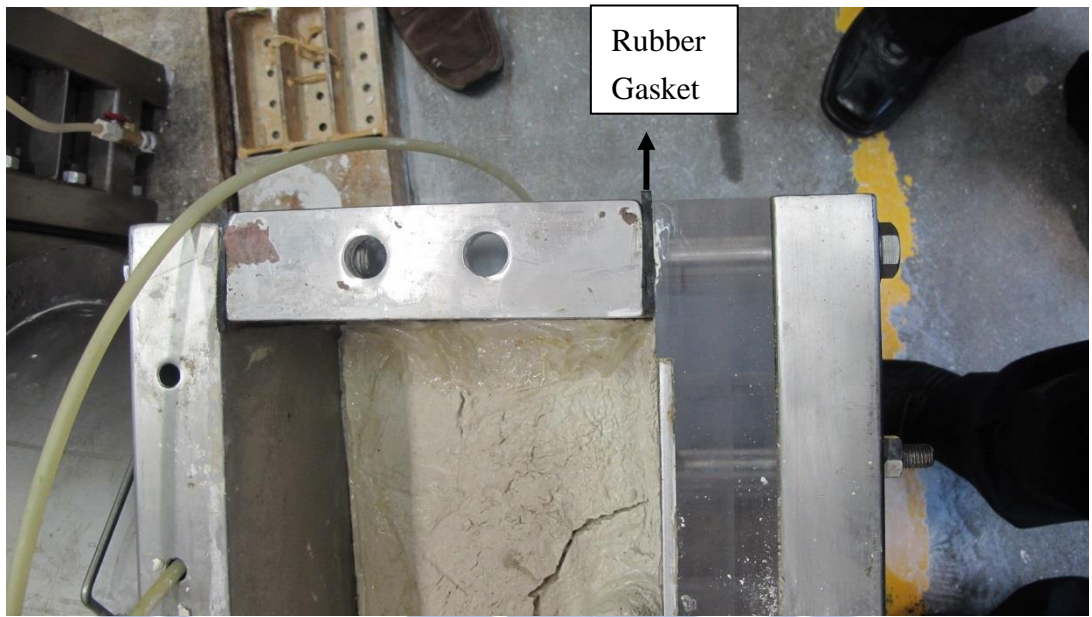
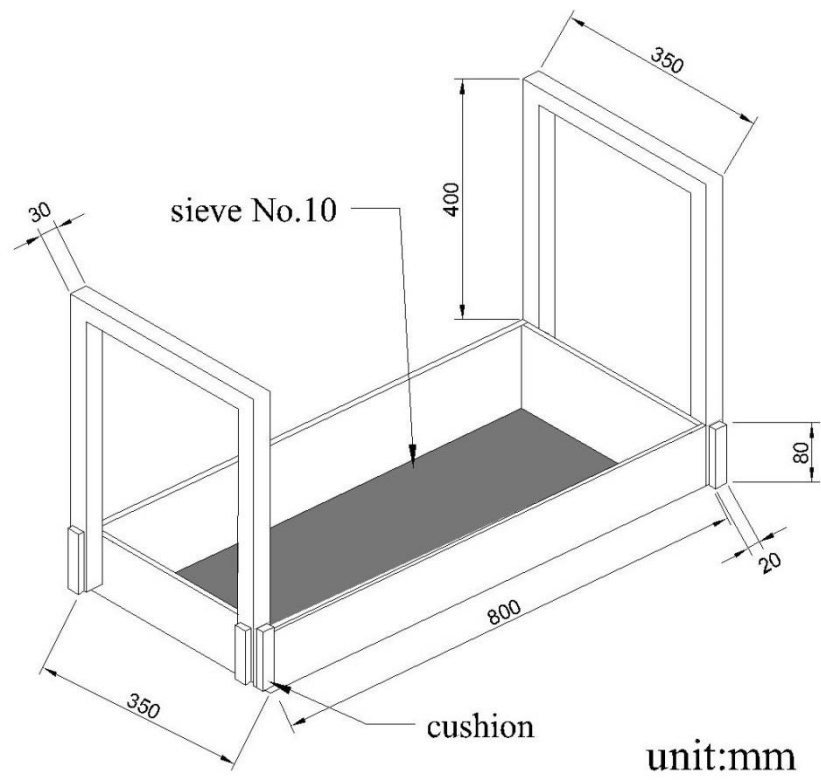


圖 3-7 NUS 試驗土槽頂視圖





(a)



(b)

圖 3-8(a)(b)以水中沉降法製作土壤試體之長方形篩網

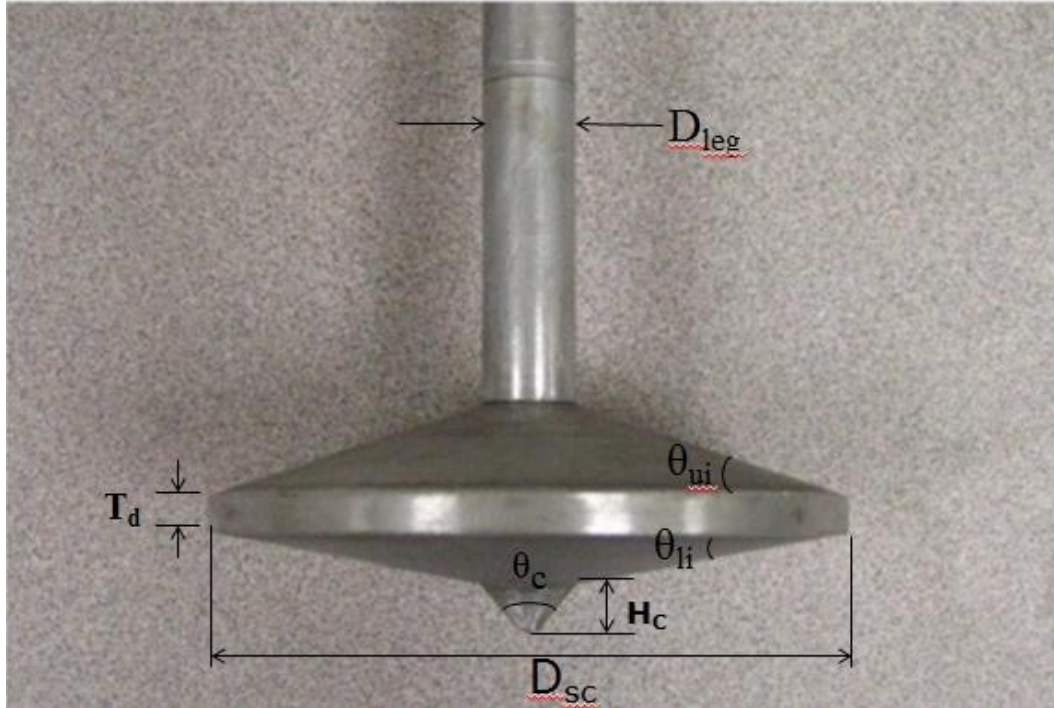


圖 3-9 spudcan 各部位尺寸及角度定義

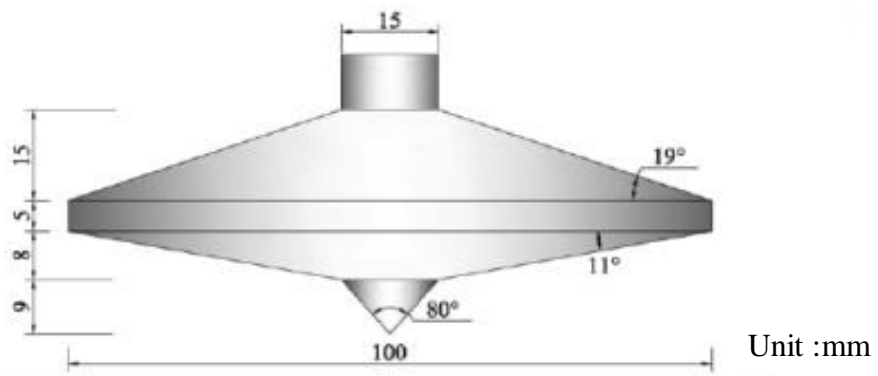


圖 3-10 NUS spudcan 模型(摘自 Lu 2007)

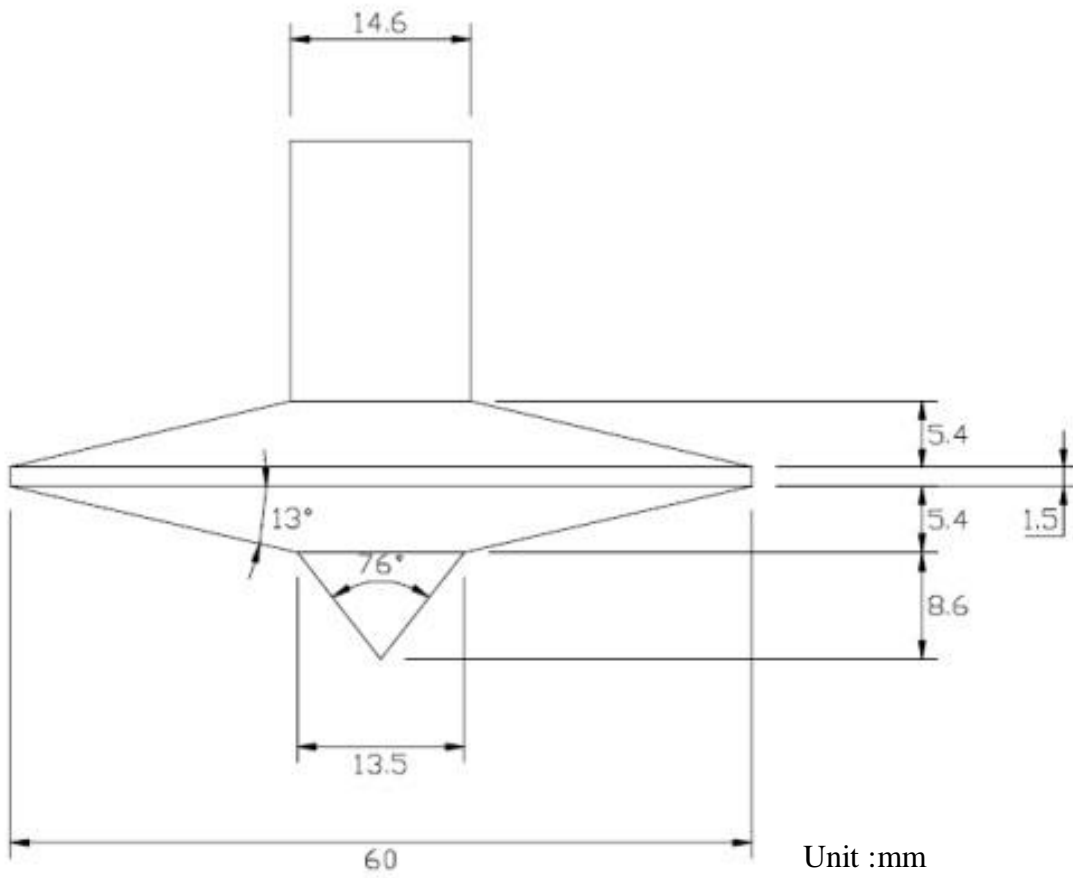
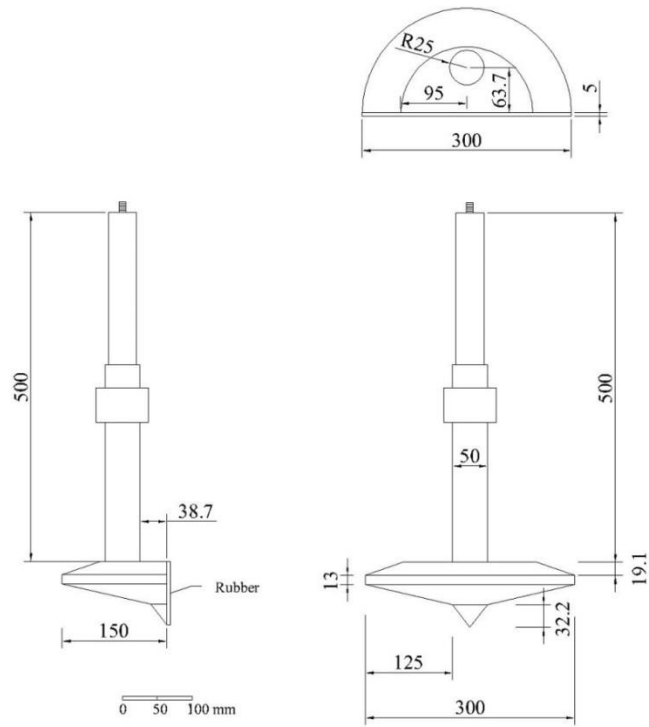


圖 3-11 UWA spudcan 模型(摘自 Hossain and Randolph 2006)







(a)



(b)

圖 3-12 NCTU half-spudcan 模型

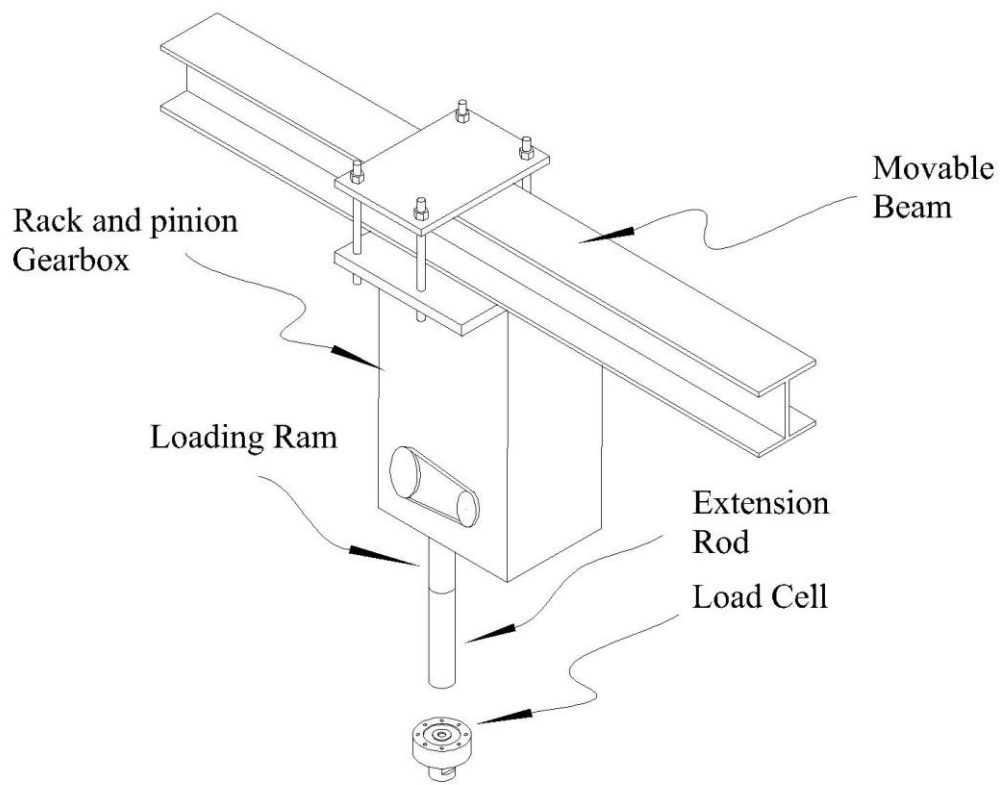


圖 3-13 垂直荷重加載系統



圖 3-14 機械式馬達齒輪箱



圖 3-15 馬達齒輪箱控制器



圖 3-16 20kN 壓拉兩用荷重計(Kyowa LUX-B-20kN-ID)



圖 3-17 電位式位移計(Kyowa DTP-D-1ks)

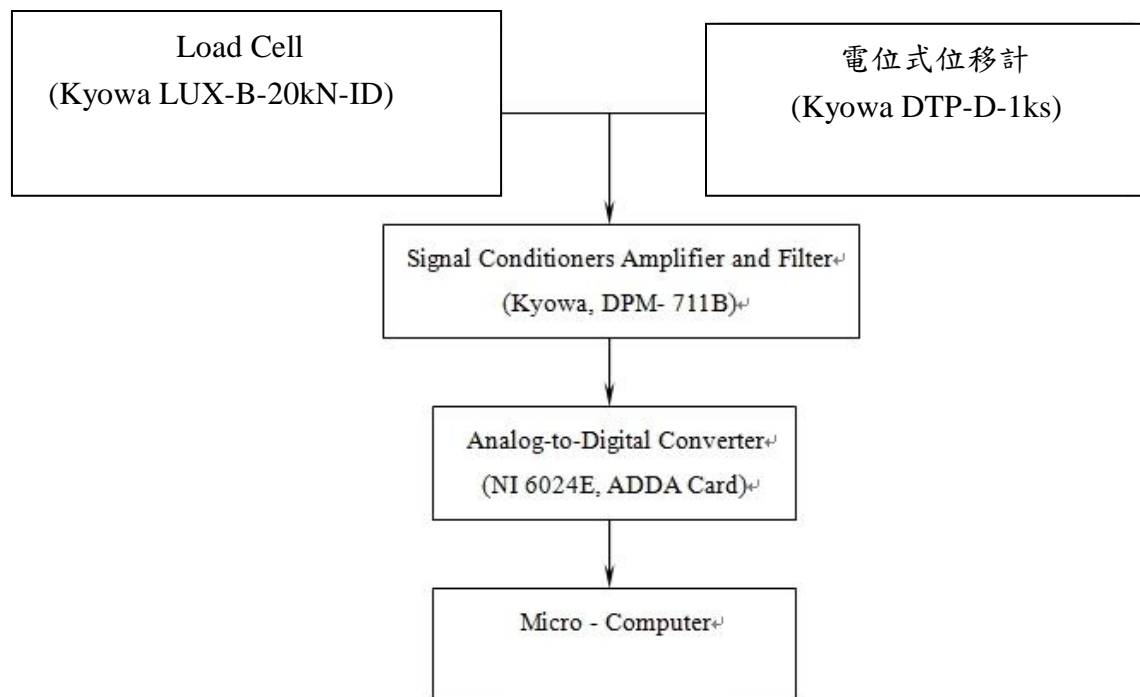


圖 3-18 資料擷取系統





圖 3-19 動態應變放大器(Kyowa DPM-711B)





圖 4-1 彰化離岸風力風場位置圖(摘自中央地調所 2000)



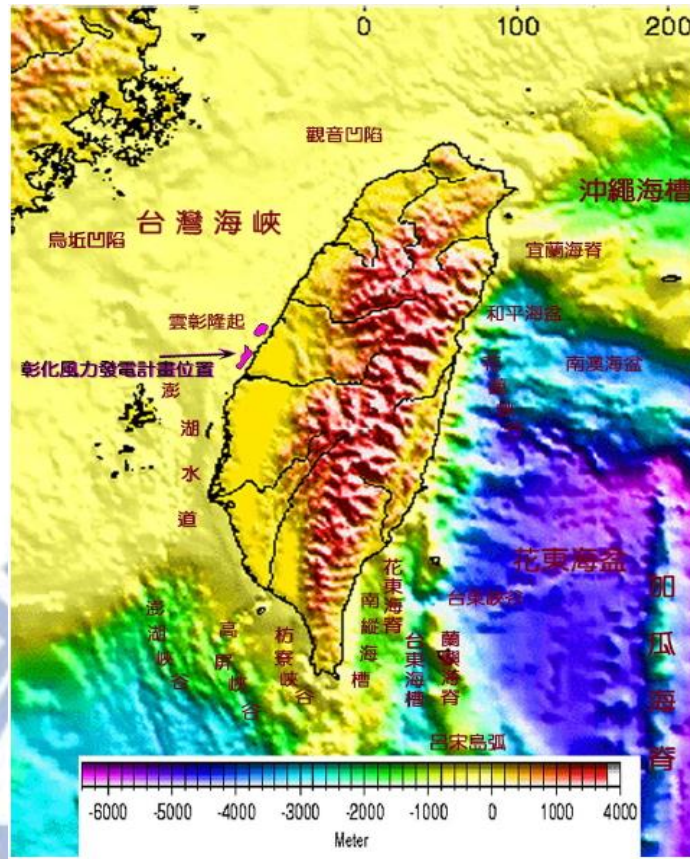


圖 4-2 台灣地區陸地及海底地形圖(摘自國家海洋科學研究中心 1999)

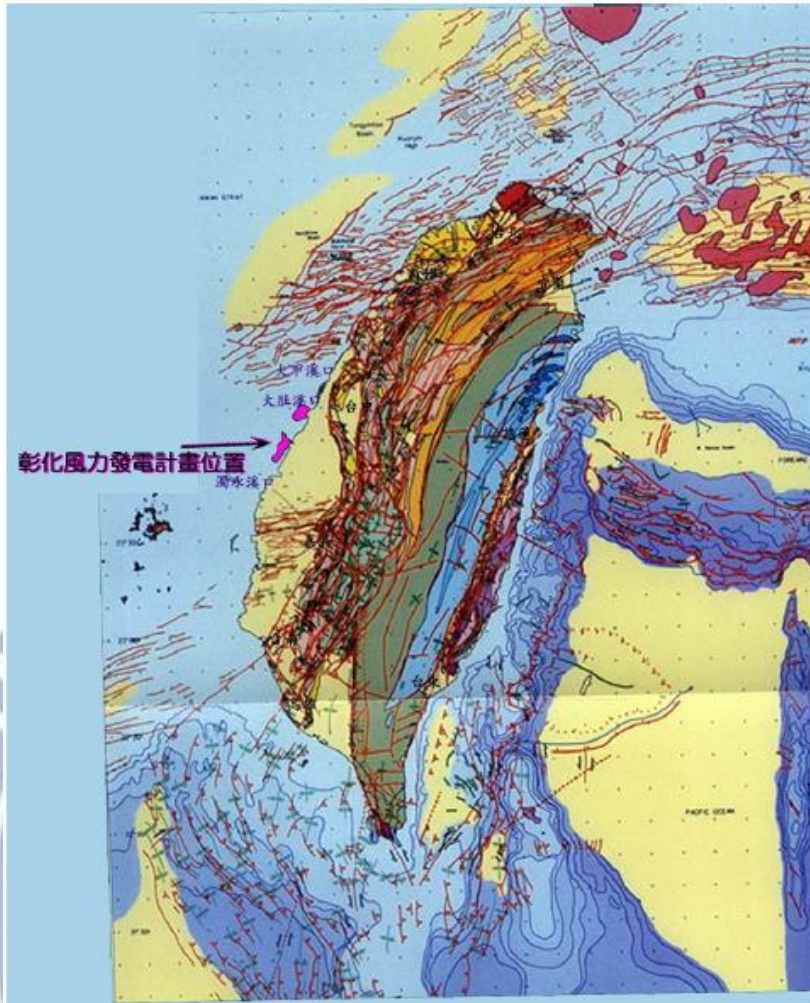


圖 4-3 台灣地體構造資料圖(摘自中央地調所 2000)

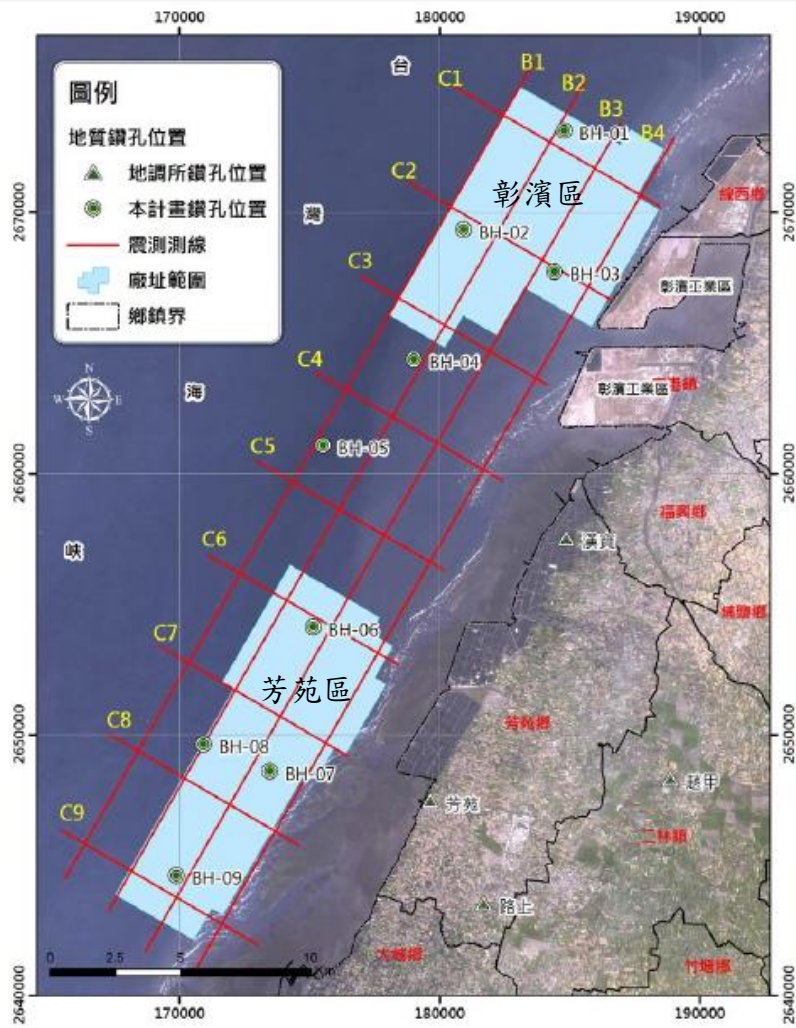


圖 4-4 彰化離岸風力發電計畫區鑽孔位置

(摘自台灣電力公司 2009)

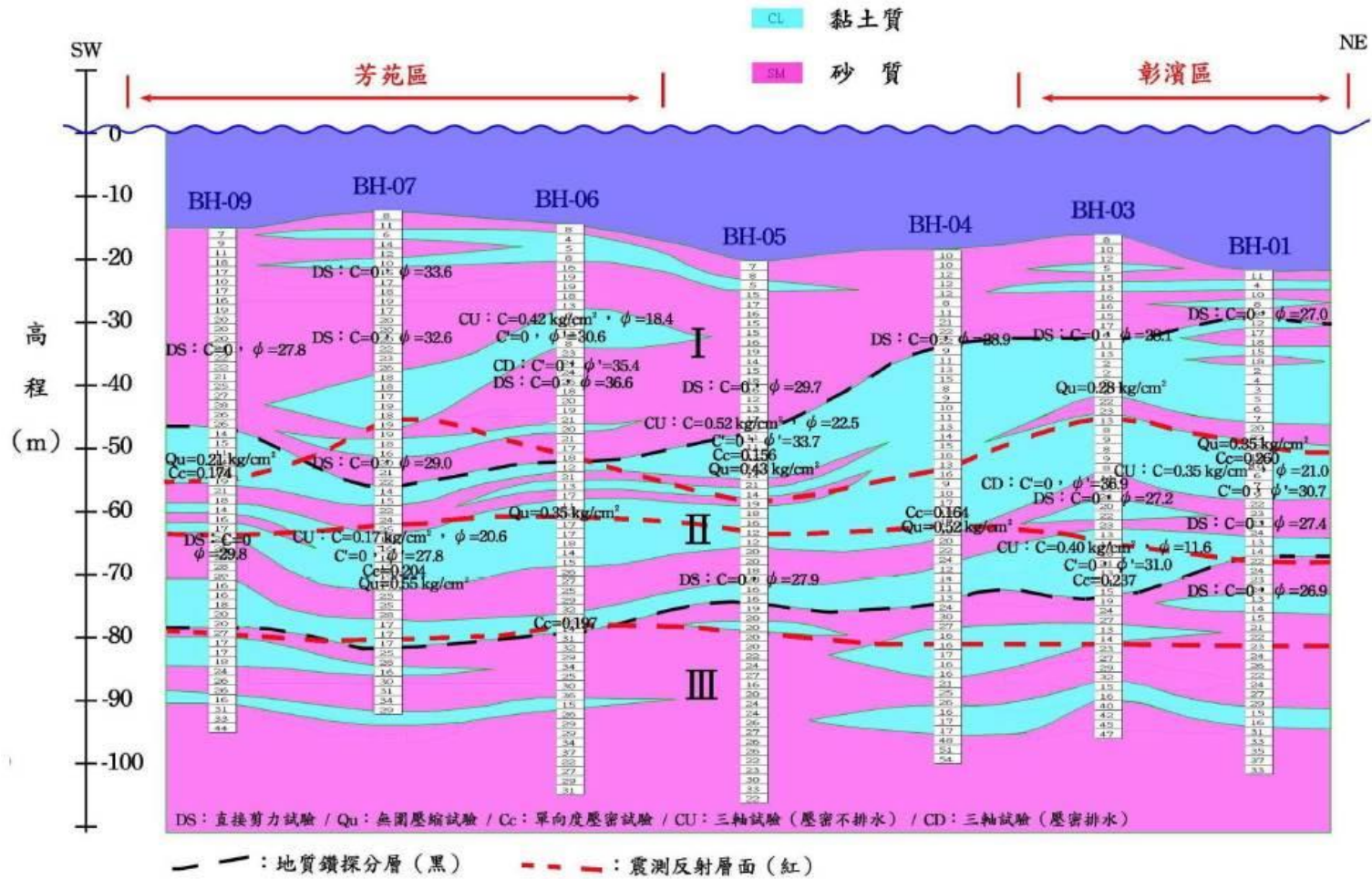


圖 4-5 彰化離岸風力發電計畫區鑽孔剖面圖(摘自台灣電力公司 2009)

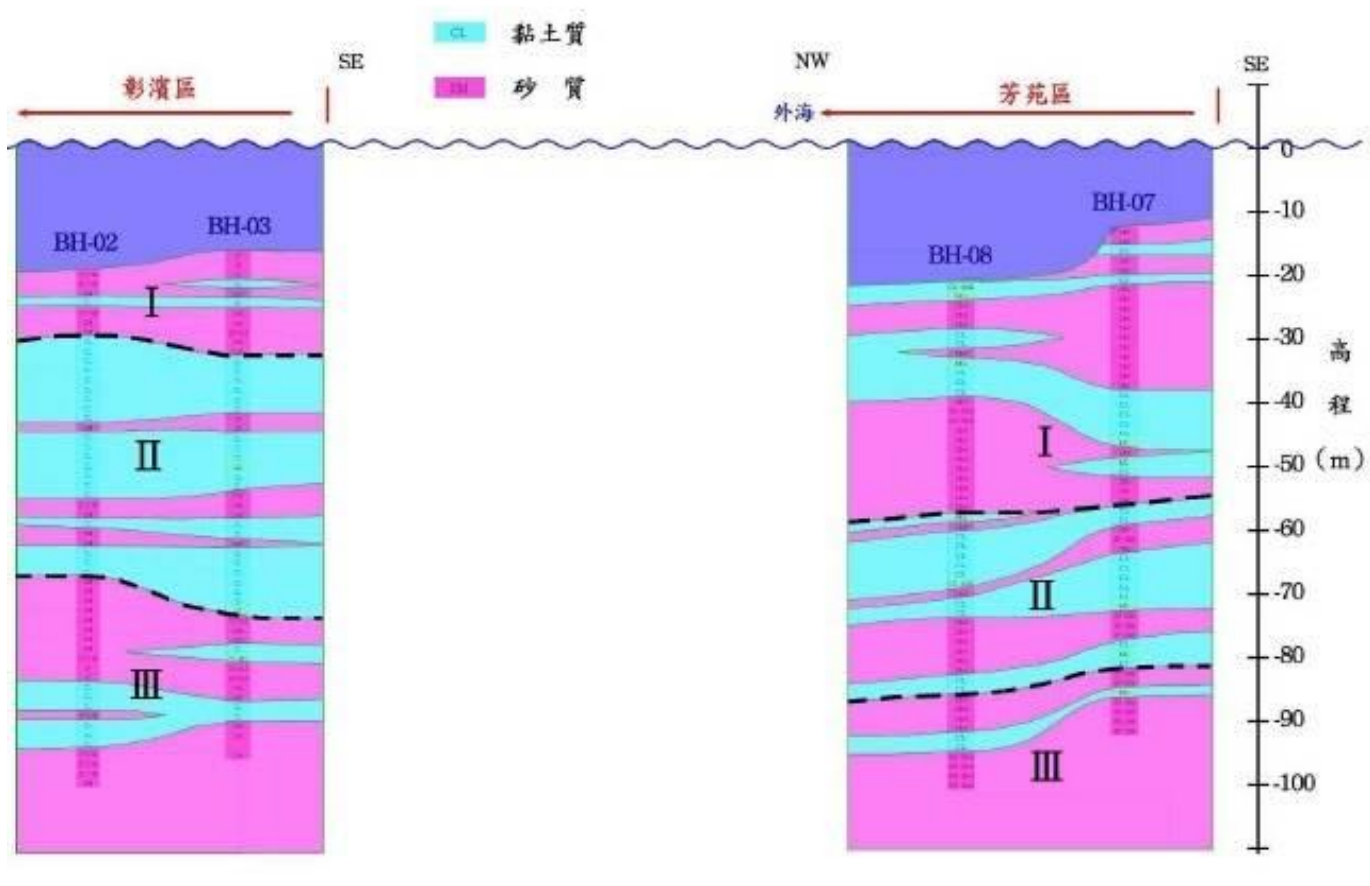


圖 4-6 彰化離岸風力發電計畫區鑽孔剖面圖(摘自台灣電力公司 2009)

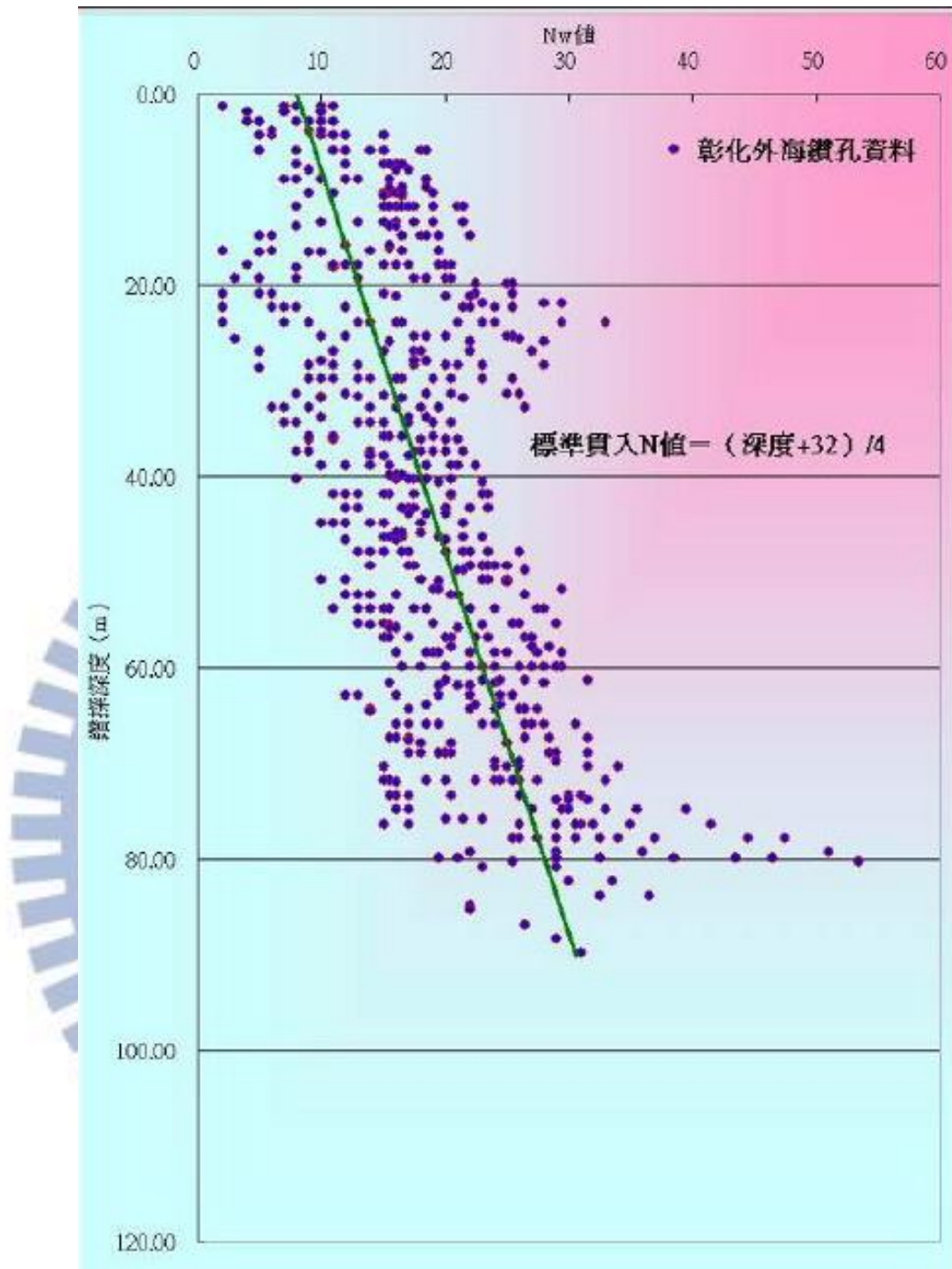


圖 4-7 深度與 SPT-N 值分布圖(摘自台灣電力公司 2009)

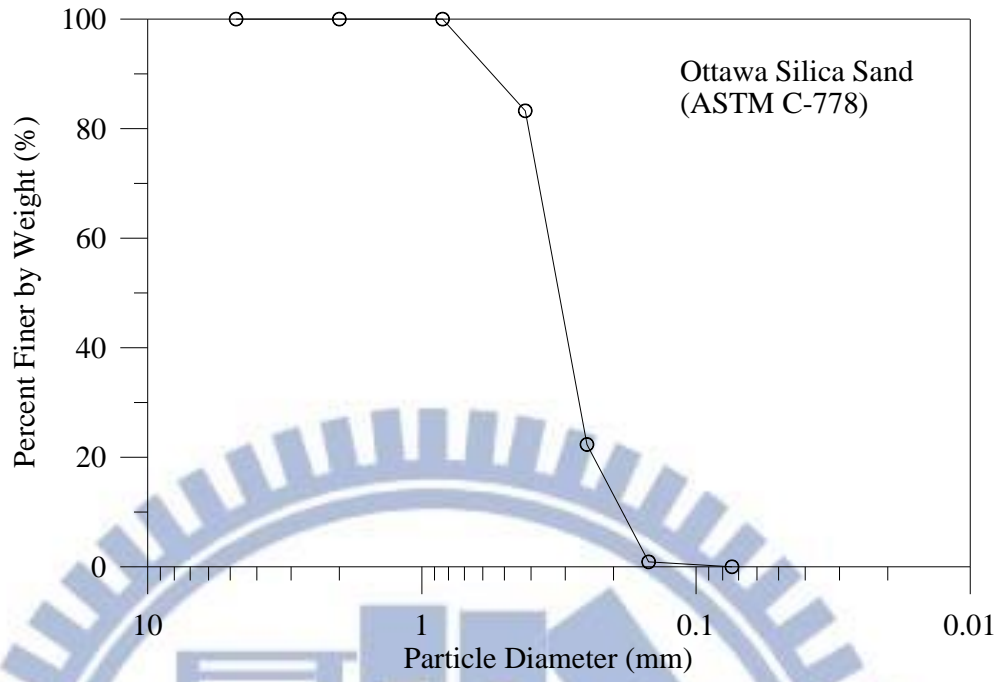


圖 4-8 渥太華砂之粒徑分布曲線(摘自 Chen 2003)

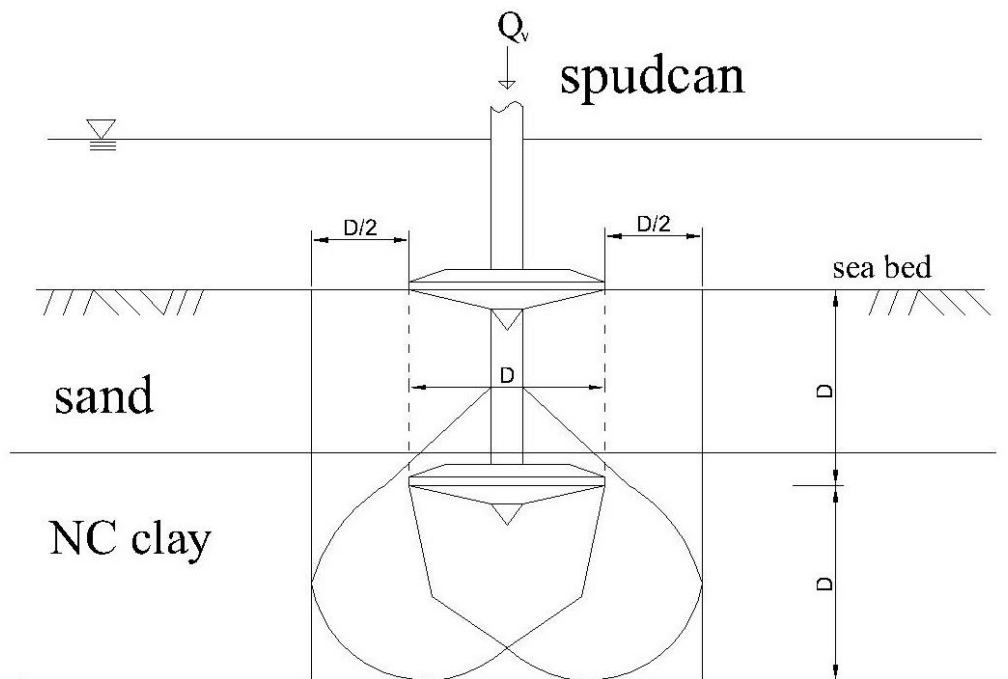


圖 4-9 Spudcan 周圍土壤之破壞面(假設 spudcan 沉陷量為  $1D$ )







圖 4-10 浸泡渥太華砂





圖 4-11 桶徑 550 mm 之大試驗桶

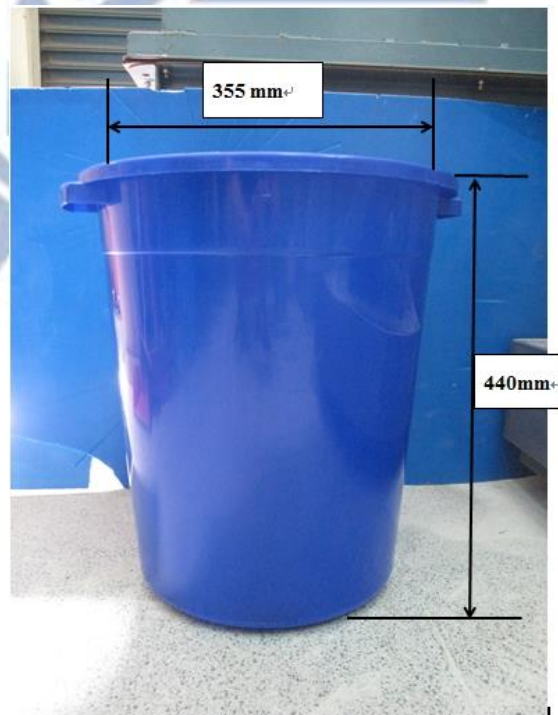


圖 4-12 桶徑 355 mm 之小試驗桶

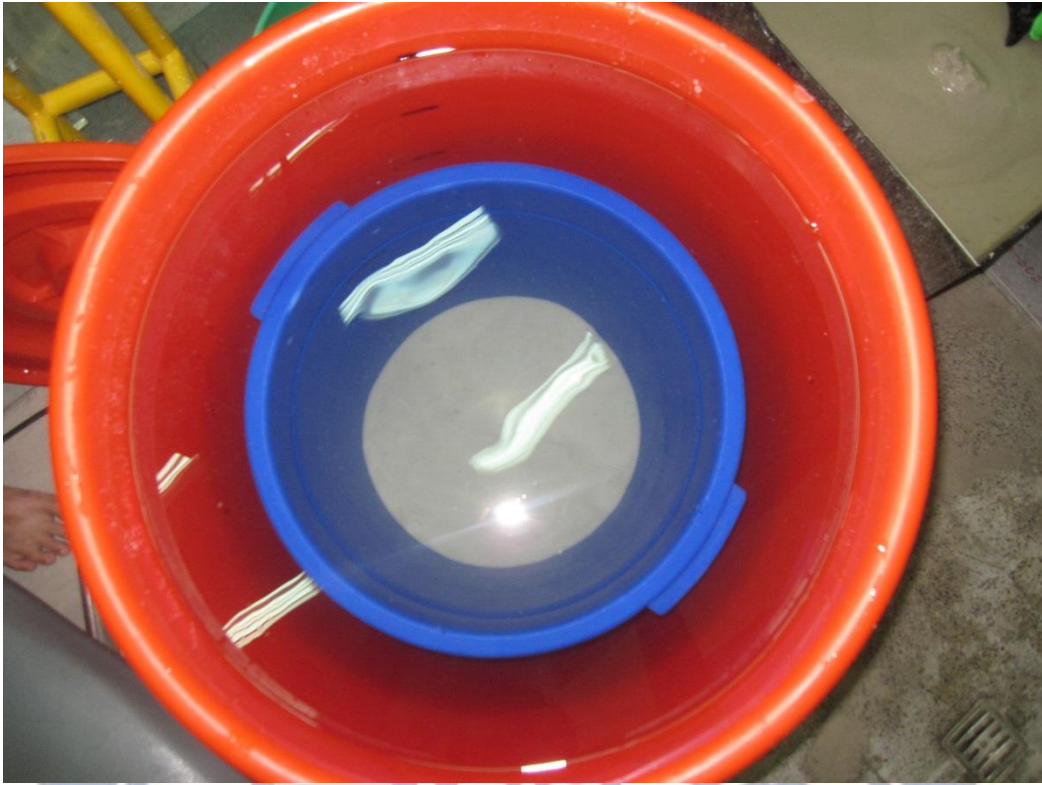


圖 4-13 將底層砂土置入桶徑 355 mm 小試驗桶



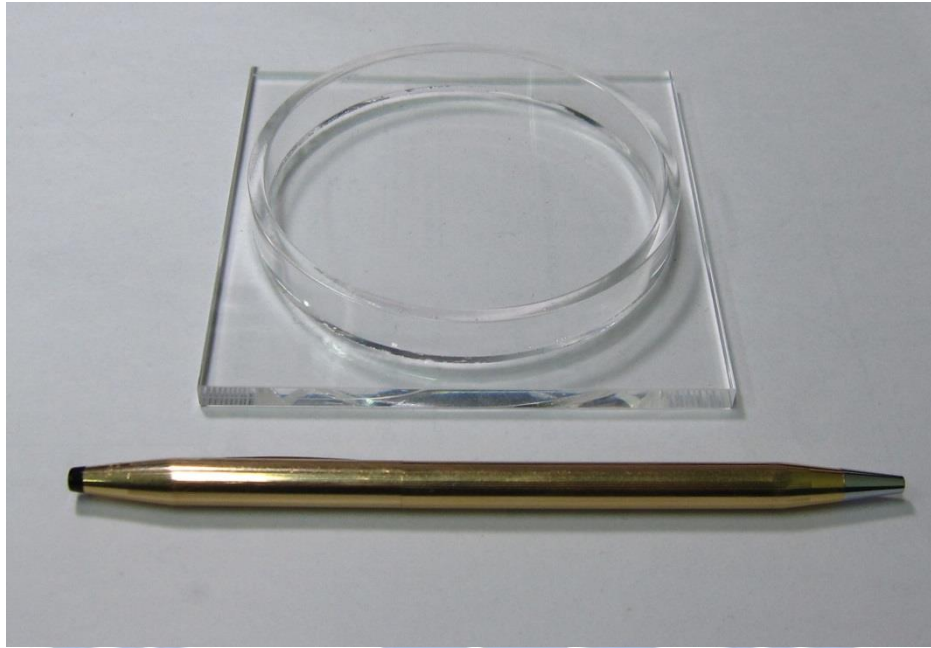


圖 4-14 砂土密度控制盒

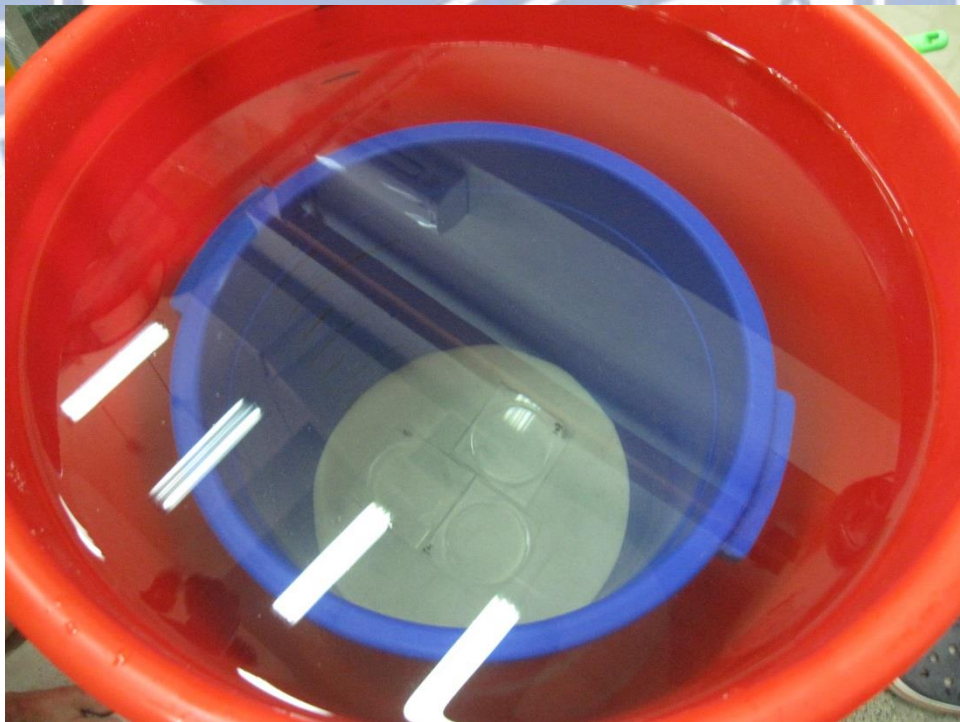


圖 4-15 砂土密度盒置入 355 mm 小試驗桶

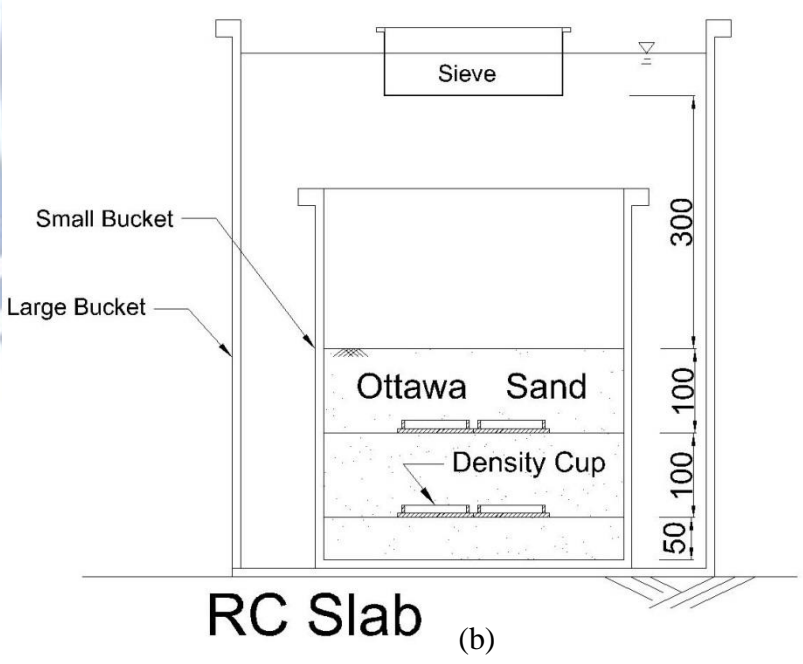
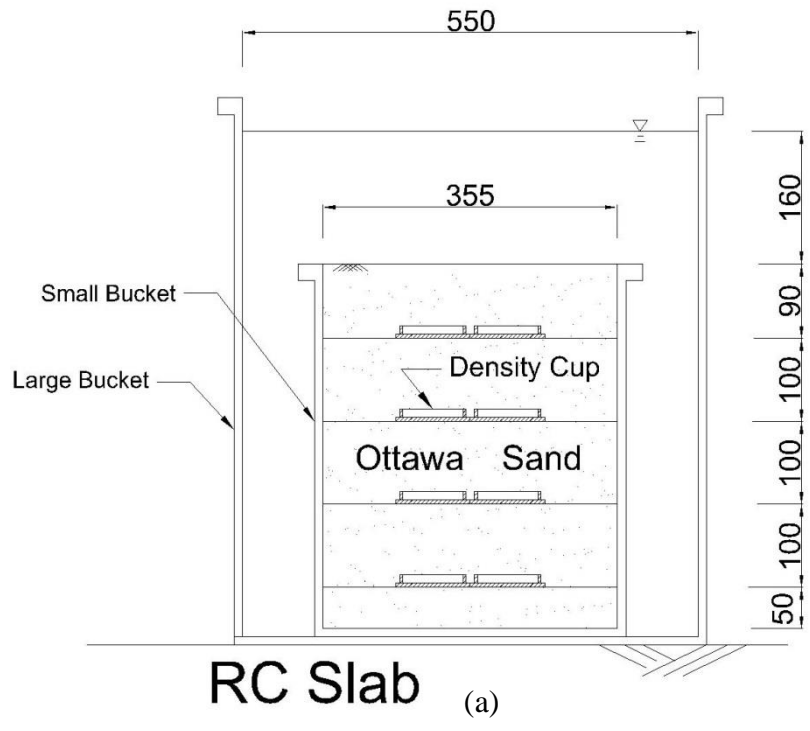


圖 4-16 (a) 密度盒在試驗桶內之擺放位置 (b)水中實降法



圖 4-17 砂土經 PVC 管滑入篩網



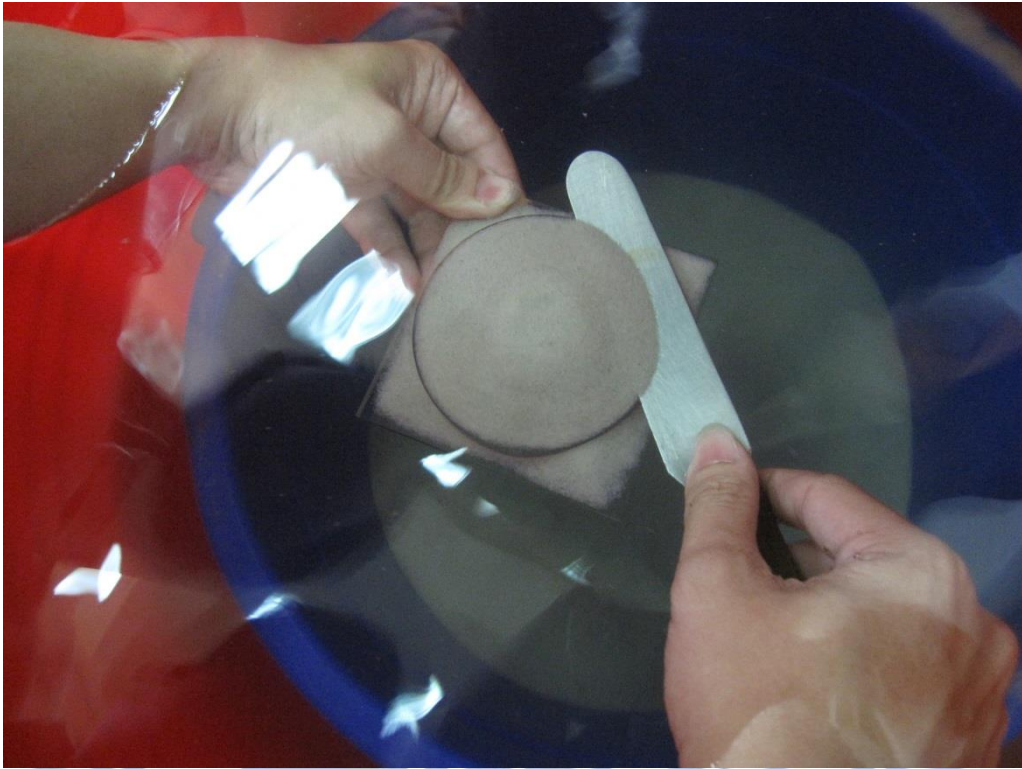


圖 4-18 水中將落入控制盒之砂土刮平





圖 4-19 將濕砂放入烘箱內烘乾





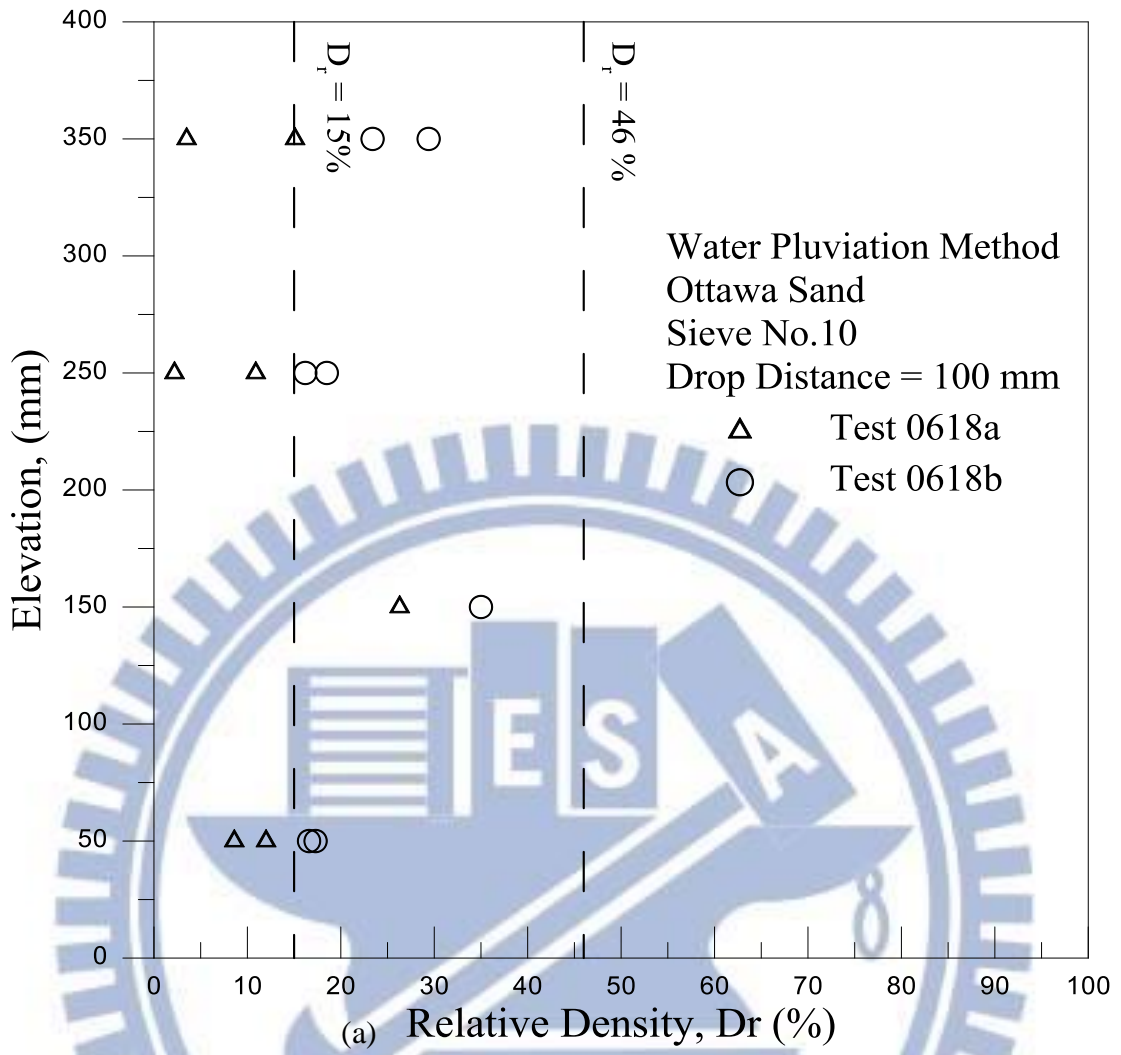


圖 4-20(a) 使用 10 號篩網及落距 100 mm 實降之砂土相對密度分布

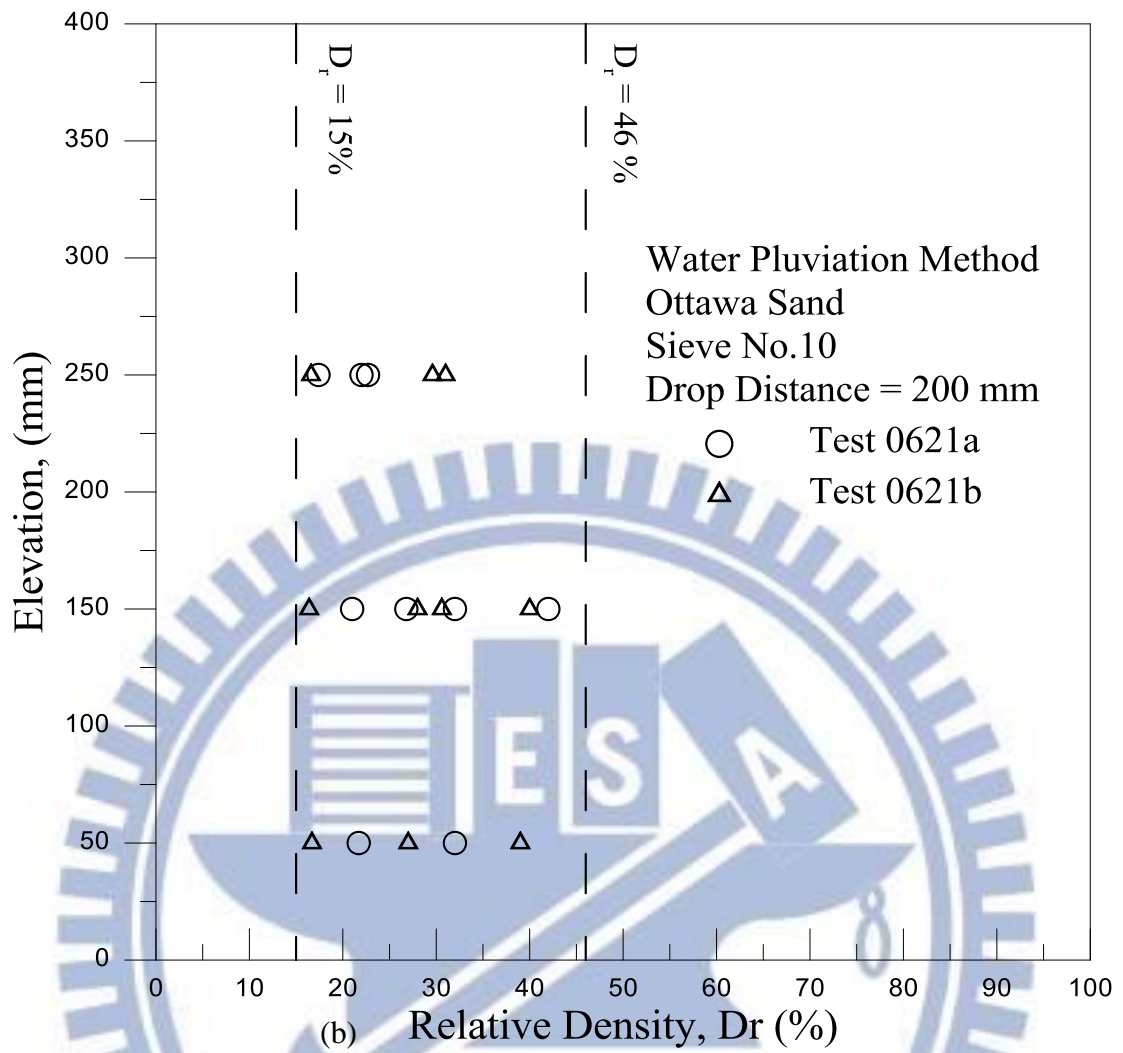


圖 4-20(b) 使用 10 號篩網及落距 200 mm 實降之砂土相對密度分布

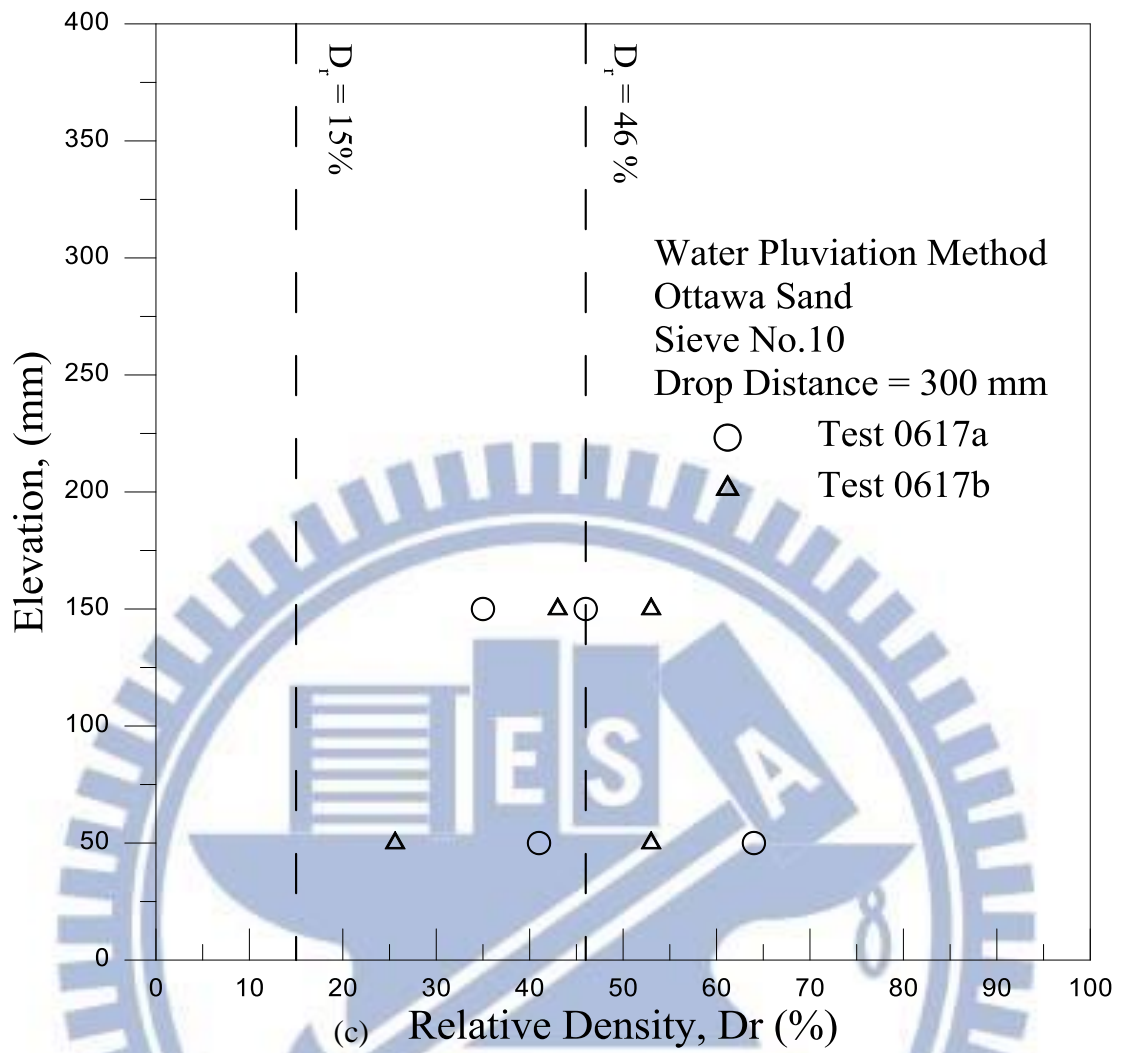


圖 4-20(c) 使用 10 號篩網及落距 300 mm 實降之砂土相對密度分布

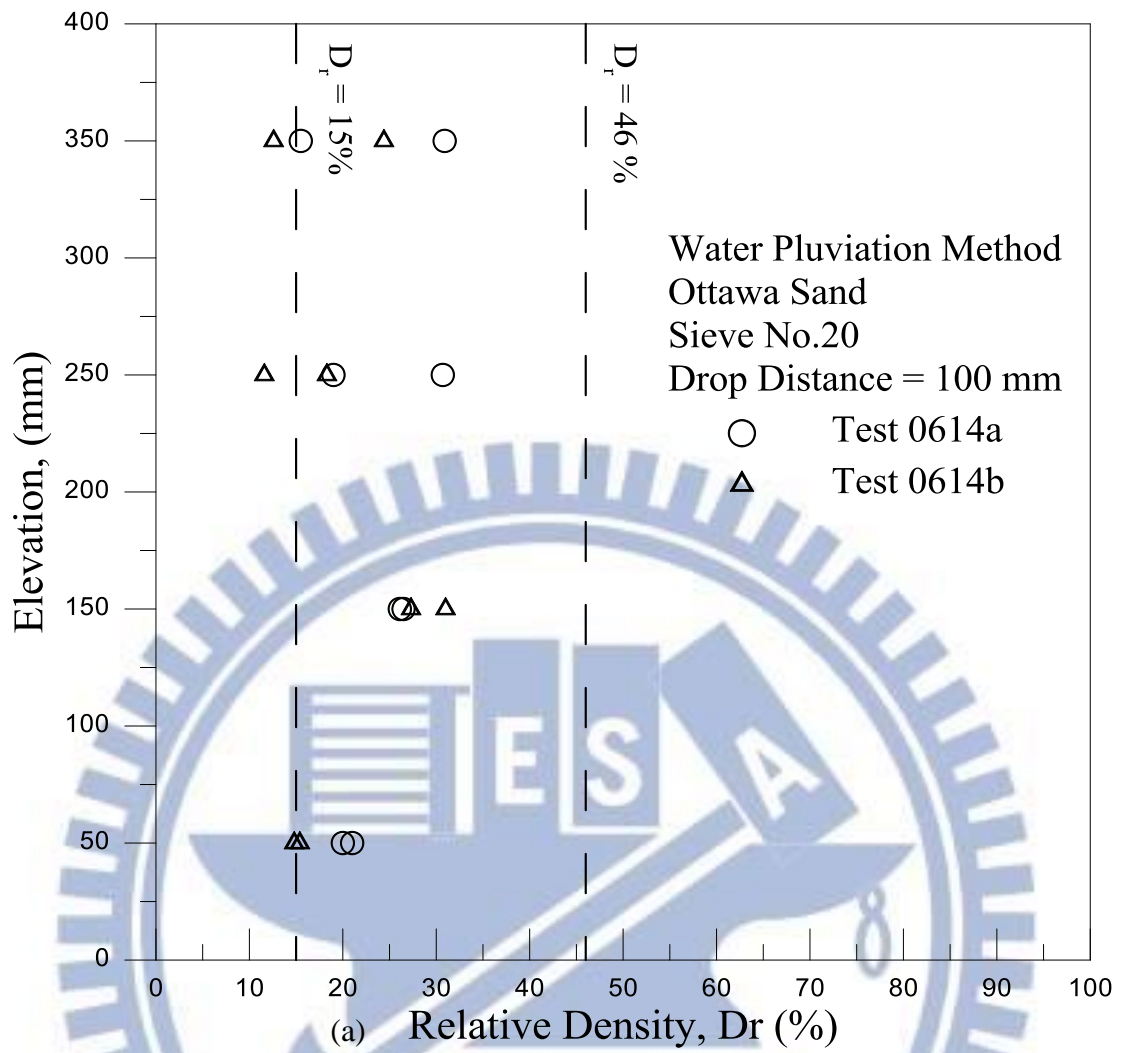


圖 4-21(a) 使用 20 號篩網及落距 100 mm 實降之砂土相對密度分布

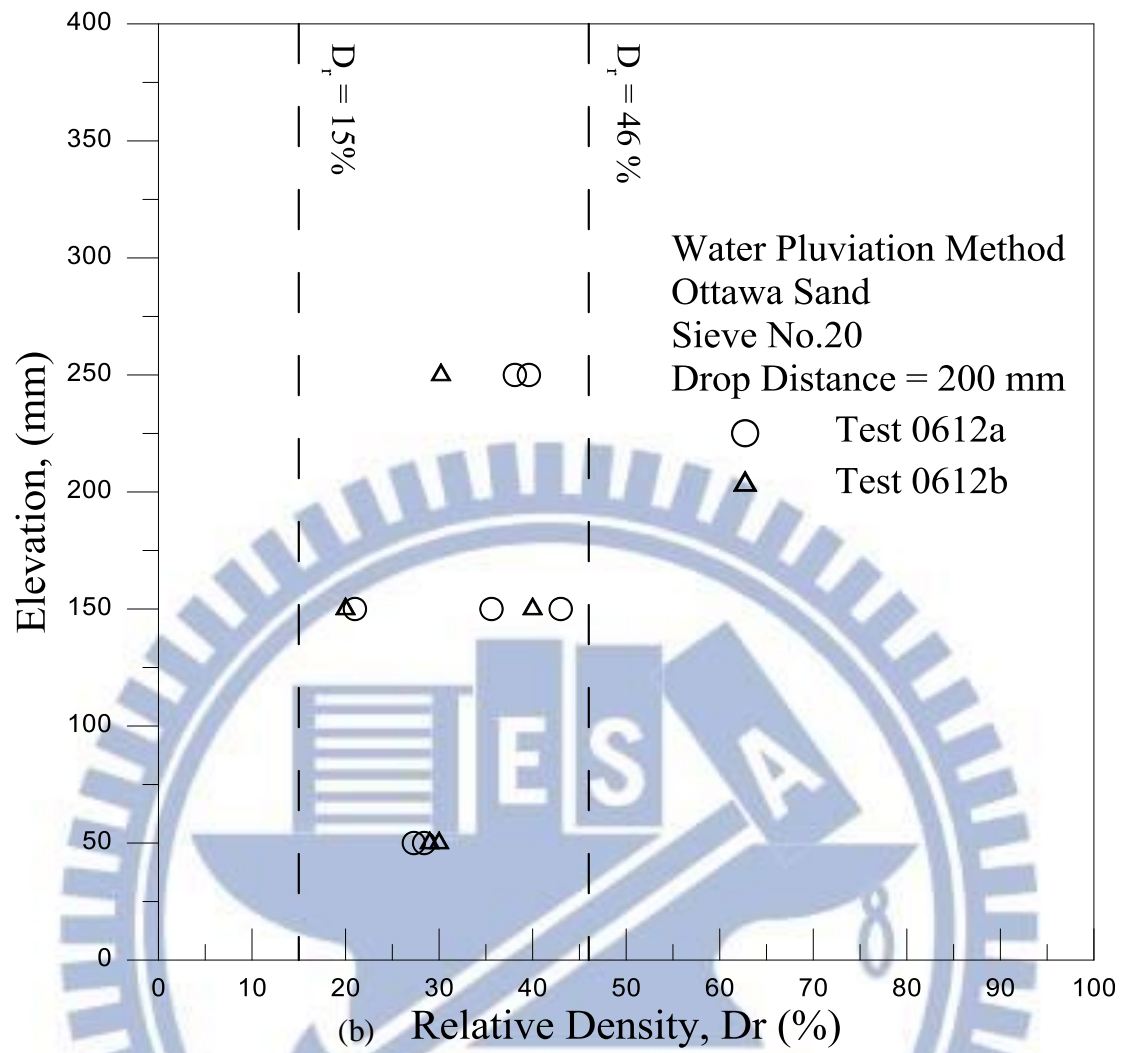


圖 4-21(b) 使用 20 號篩網及落距 200 mm 實降之砂土相對密度分布

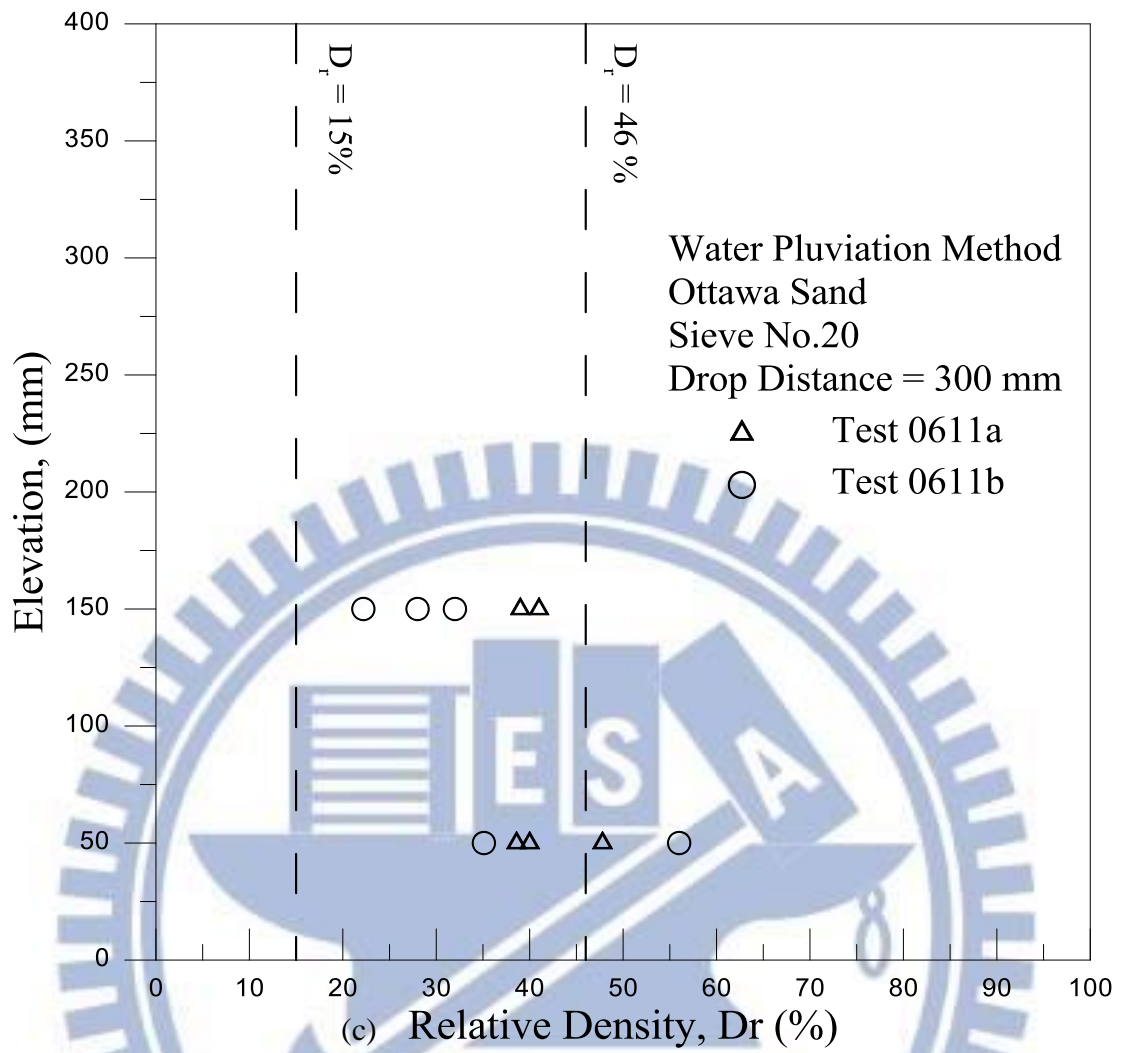


圖 4-21(c) 使用 20 號篩網及落距 300 mm 實降之砂土相對密度分布

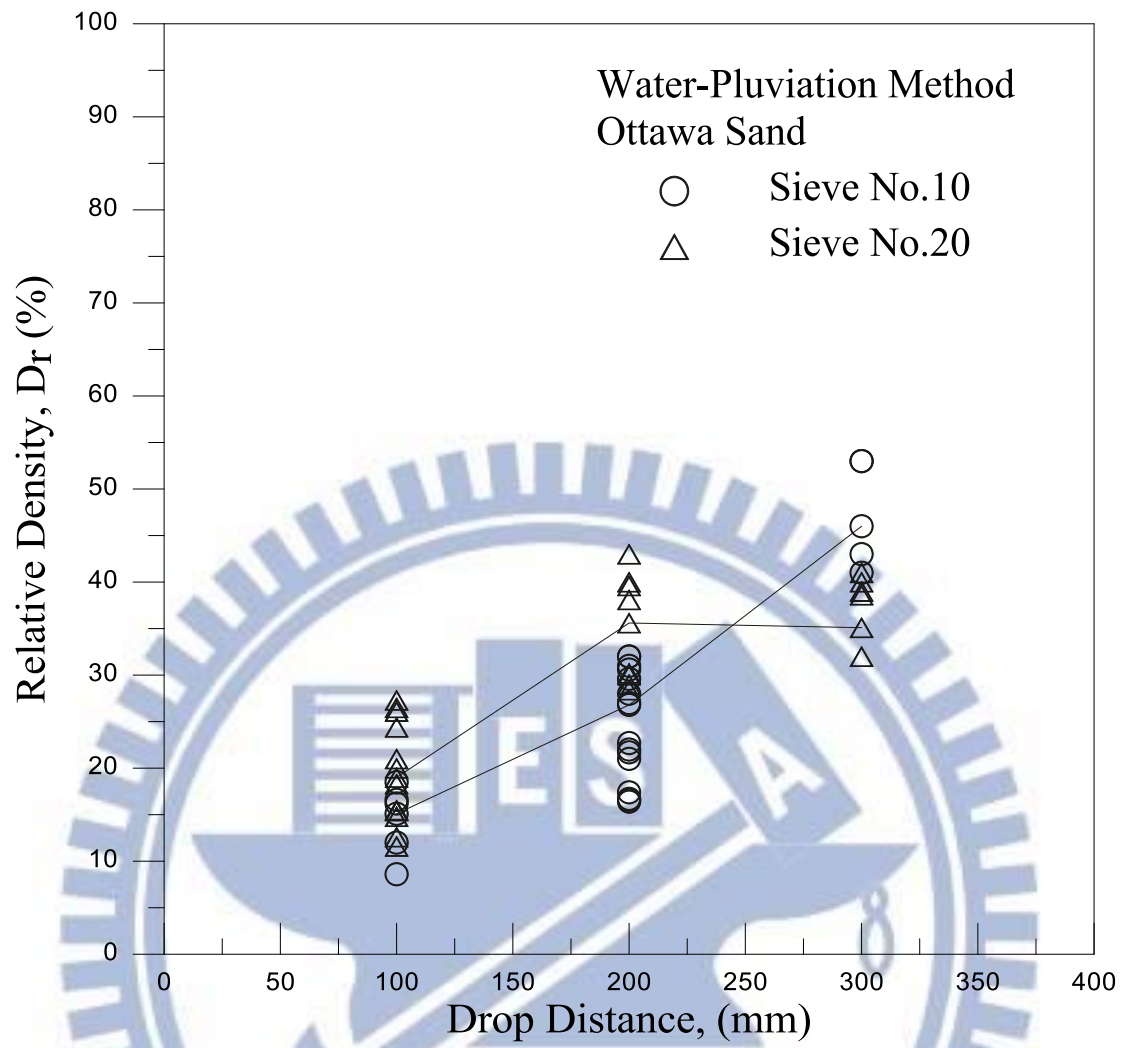


圖 4-22 水中沉降落距與砂土相對密度關係圖



圖 5-1 真空幫浦



圖 5-2(a) 土槽上方放置氣密橡膠條





圖 5-2(b) 橡膠條上塗上凡士林





圖 5-3 試驗土槽上方之蓋板及夾具與壓力表

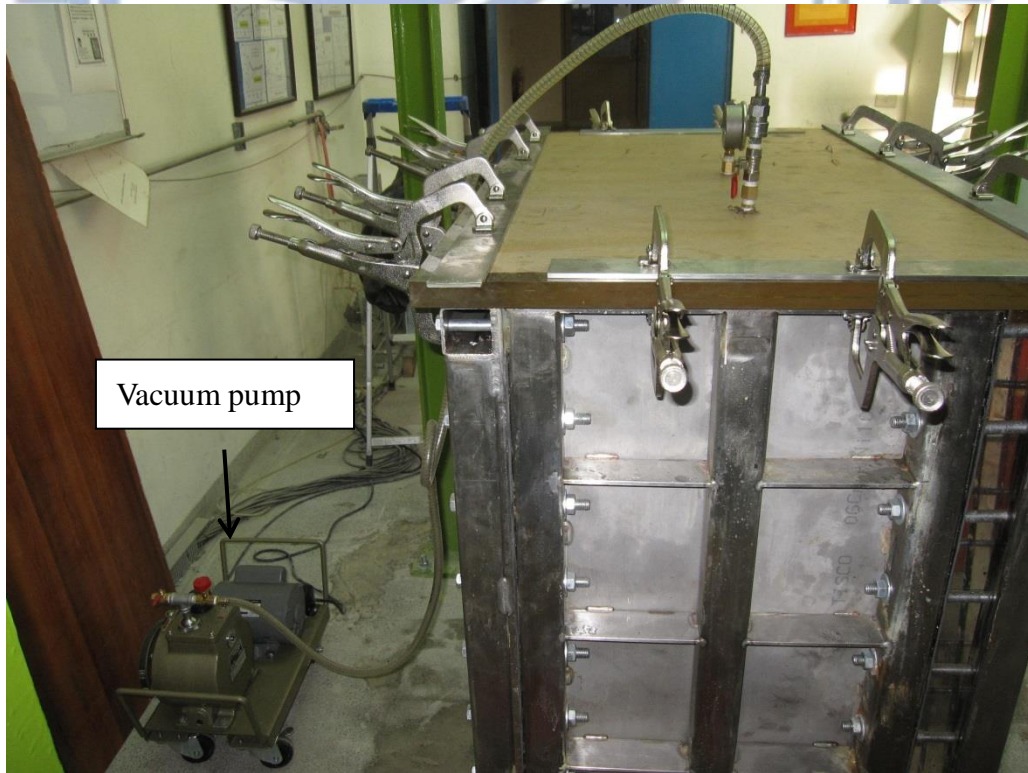


圖 5-4 以真空幫浦進行除氣

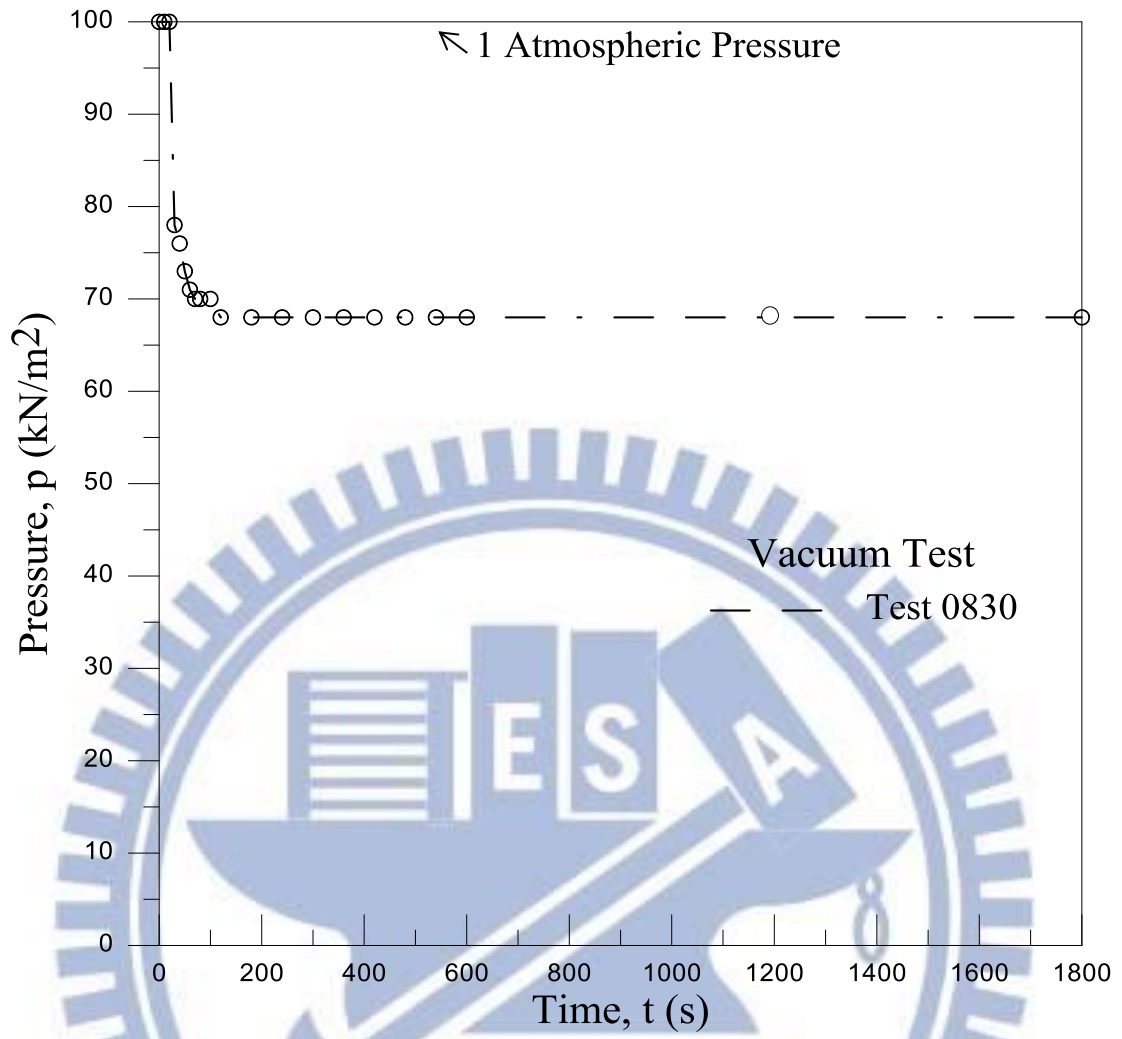


圖 5-5 試體除氣試驗壓力與時間關係

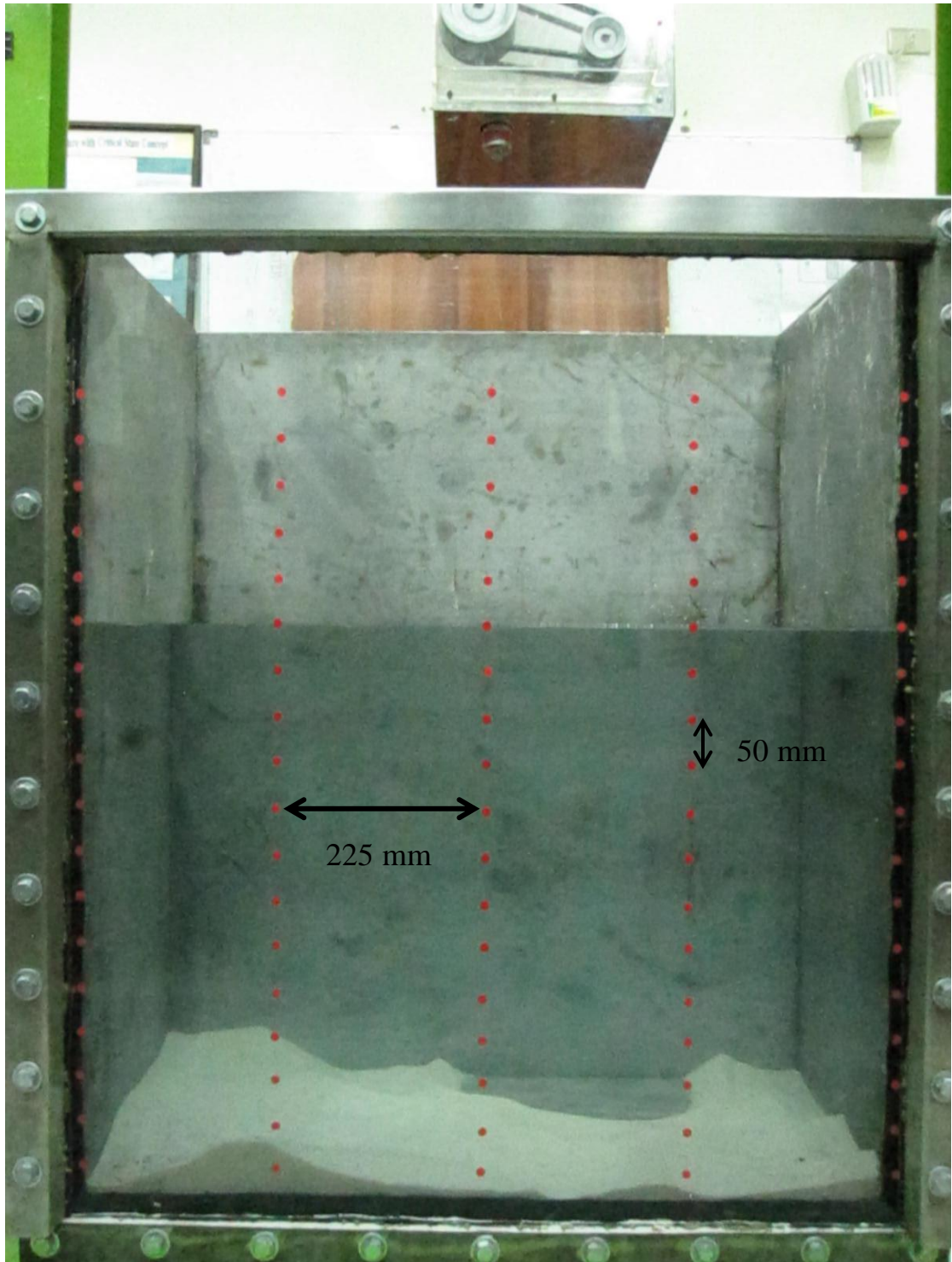


圖 5-6 壓克力視窗外側黏貼紅色固定點

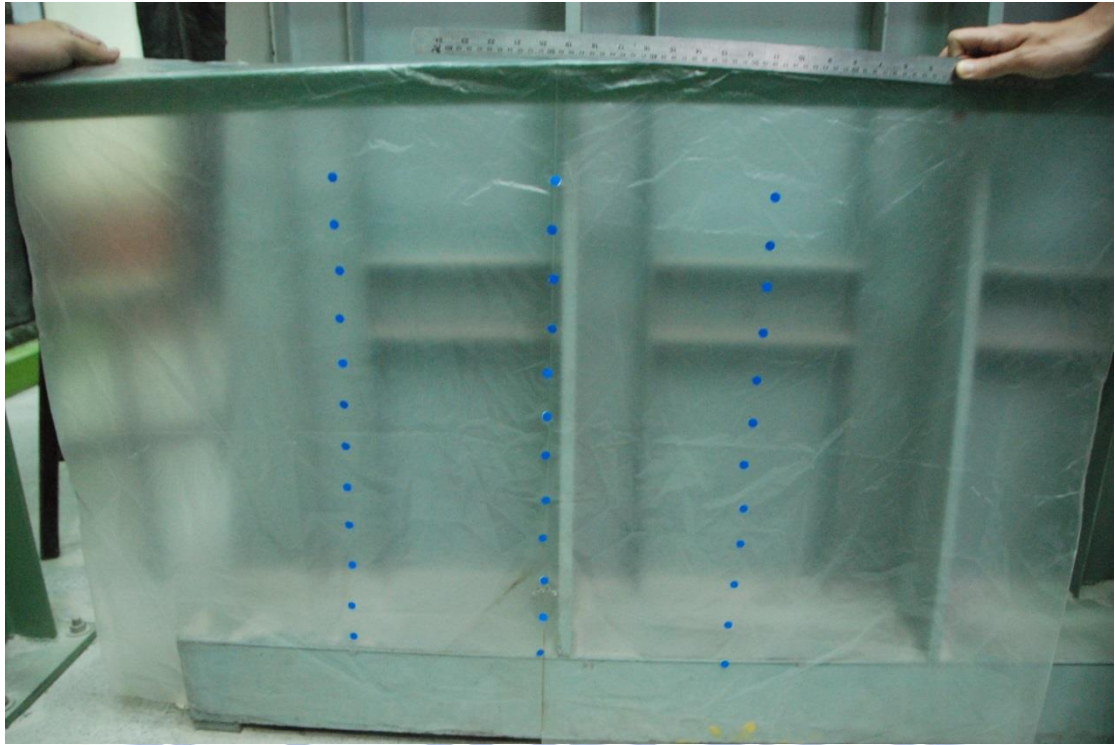


圖 5-7(a) 塑膠膜上黏貼藍色圓點



5-7(b) 藍色圓點與紅色圓點的相對位置

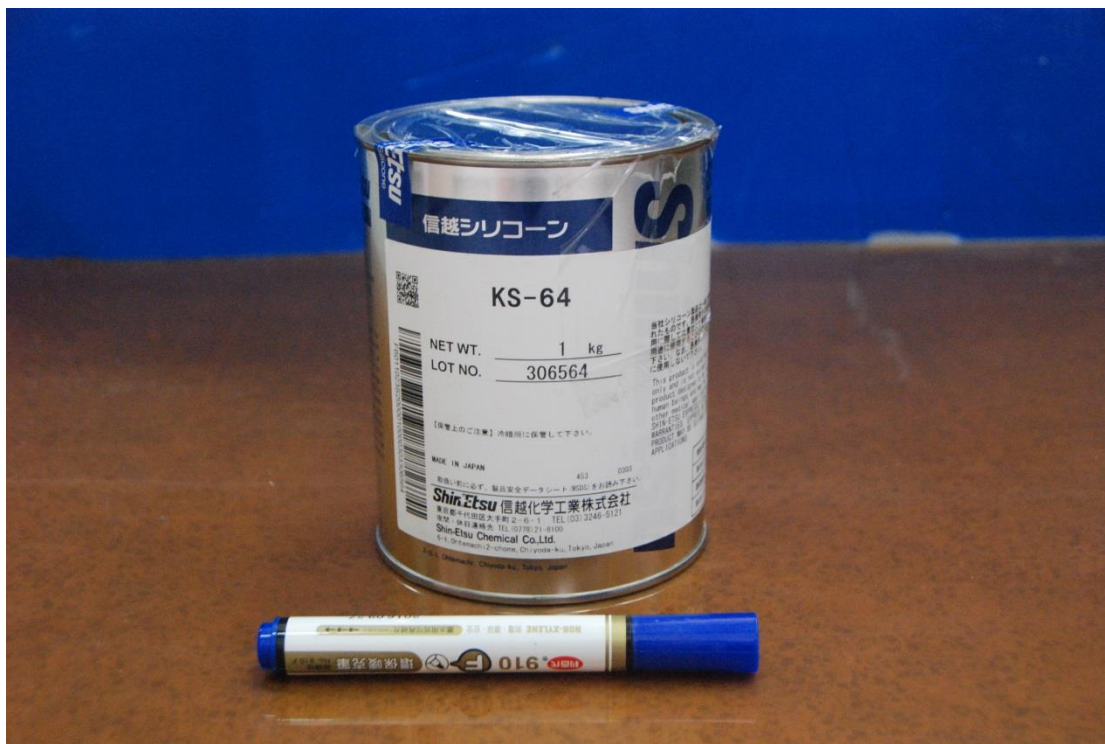


圖 5-8 矽油 (Shin-Etsu KS-64)



圖 5-9 塑膠膜



圖 5-10 將矽油塗抹壓克力內牆



圖 5-11 將塑膠膜鋪設於壓克力牆內側





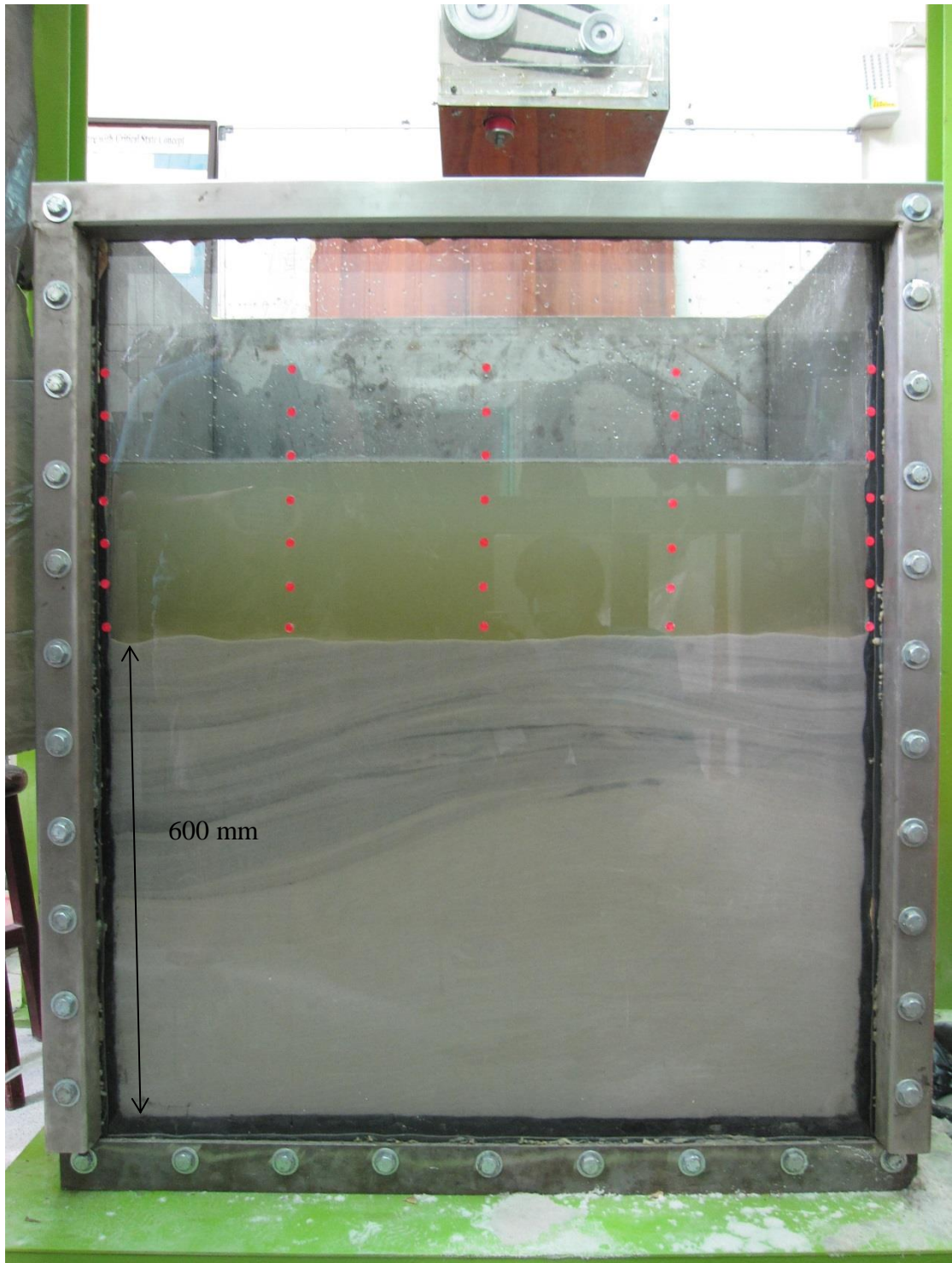


圖 5-12 將飽和渥太華砂填入土槽至 600 mm

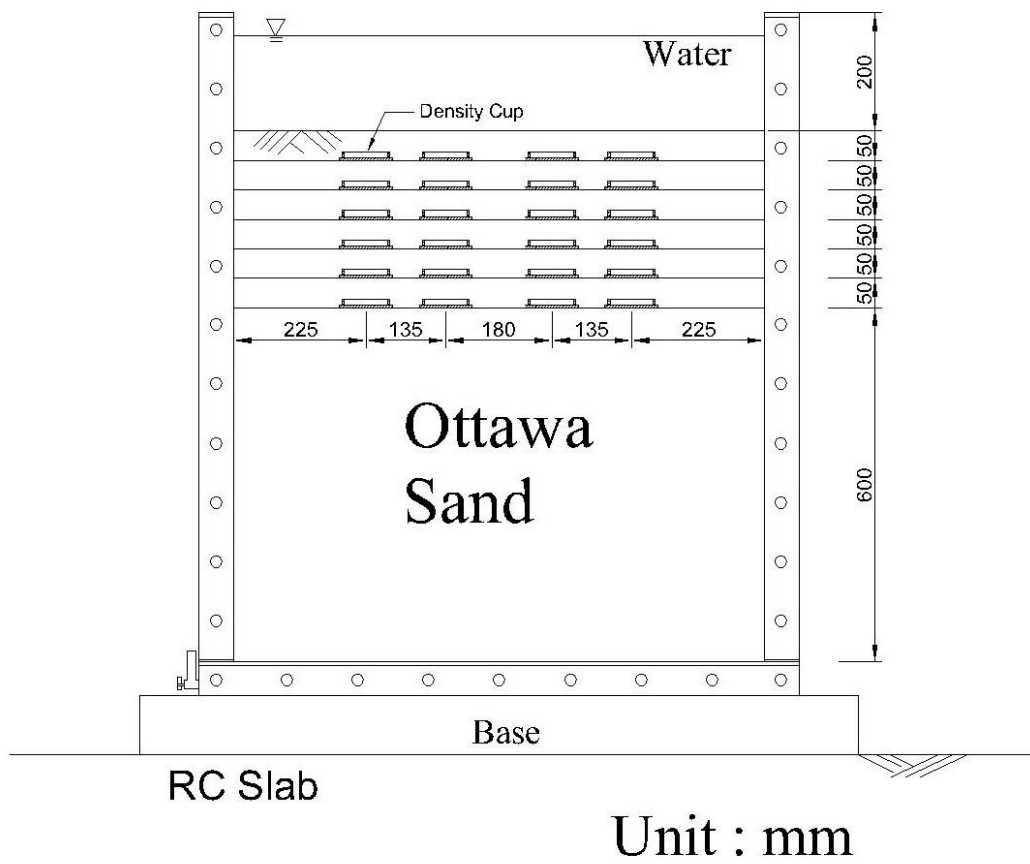
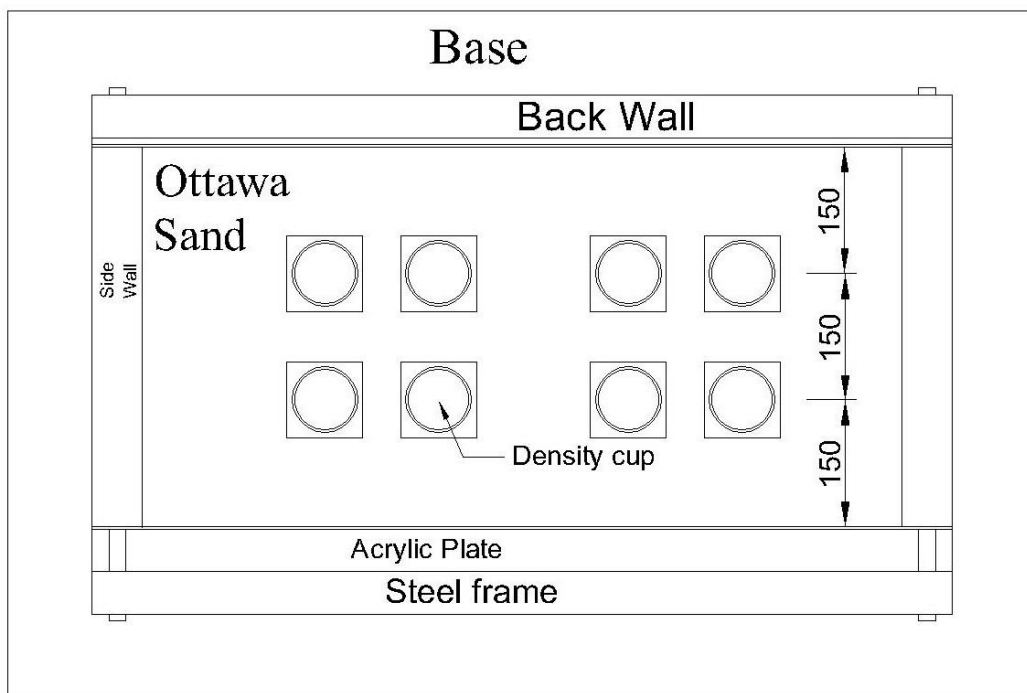


圖 5-13 密度盒擺放位置前視圖



Unit : mm

圖 5-14 密度盒擺放位置俯視圖



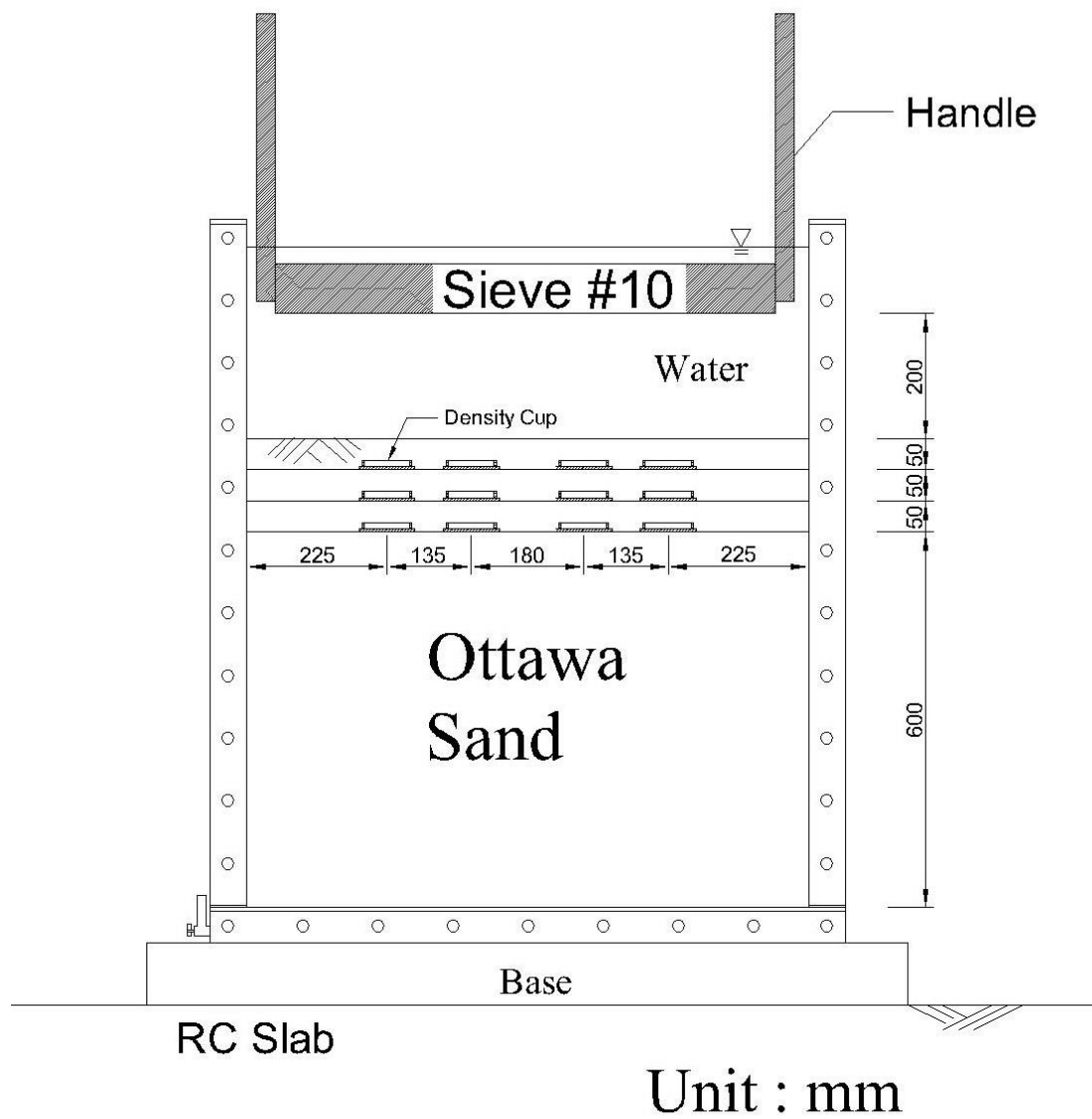


圖 5-15(a) 水中實降法示意圖



圖 5-15(b) 水中實降法示意圖



圖 5-16(a) 長方形篩網進行水中實降法



圖 5-16(b) 密度盒在水中刮平圖



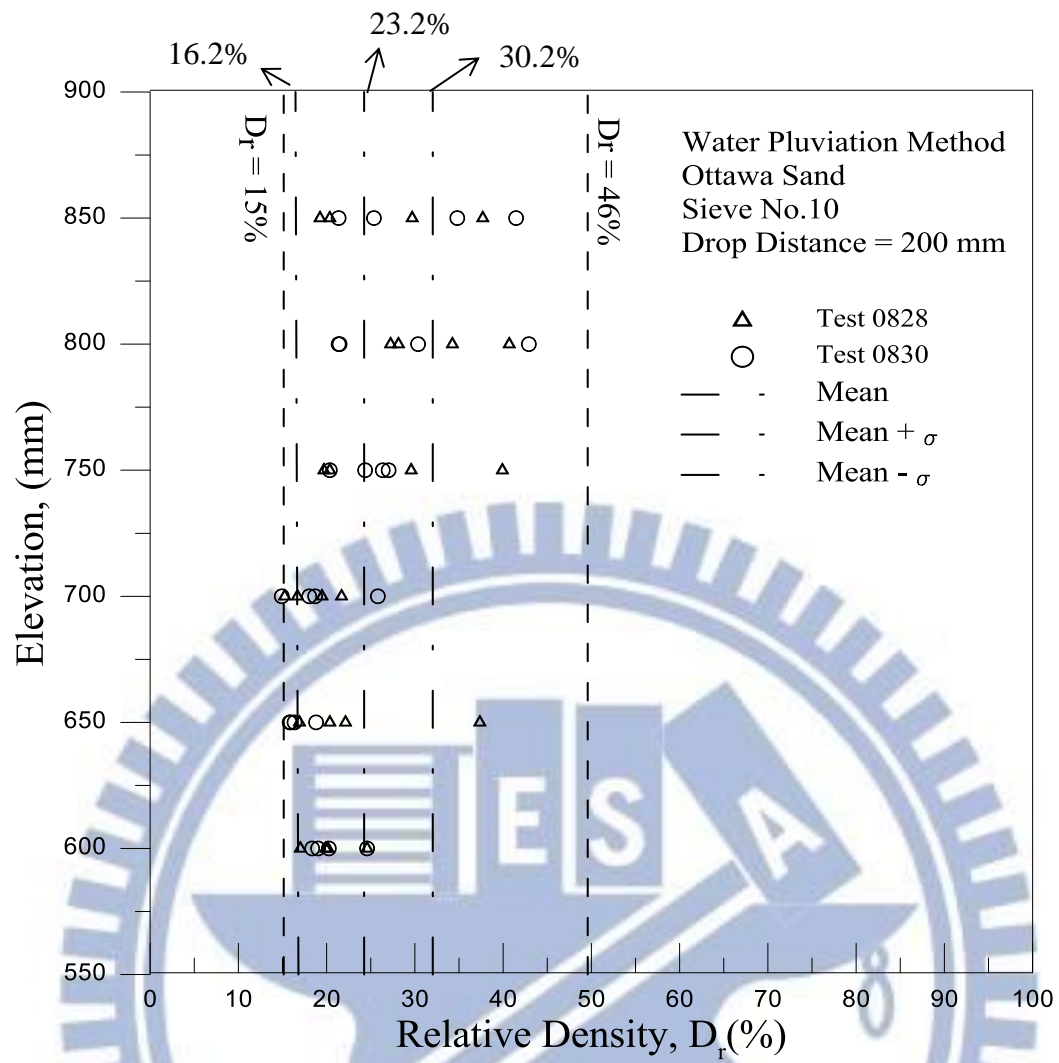


圖 5-17 水中實降法試驗結果

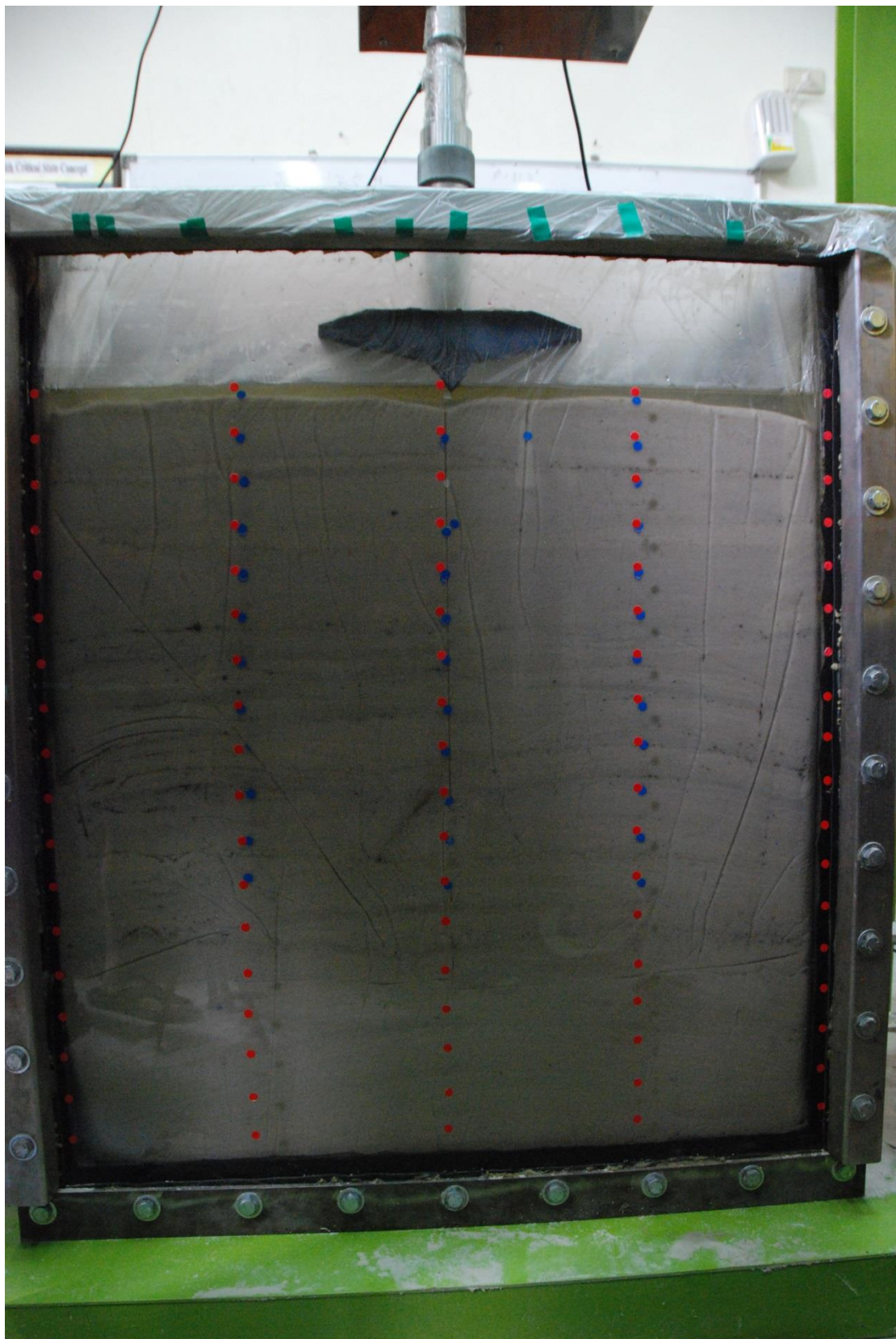


圖 5-18 spudcan 貫入前土層備製至 900 mm



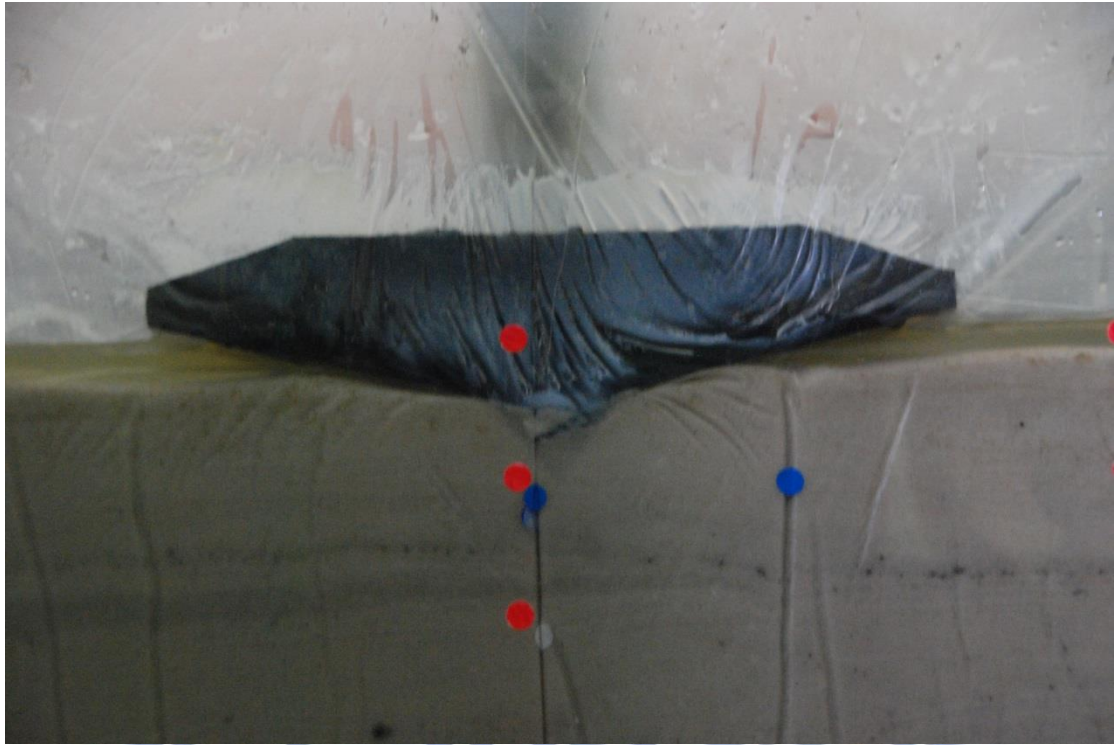


圖 5-19 spudcan 貫入前起始點



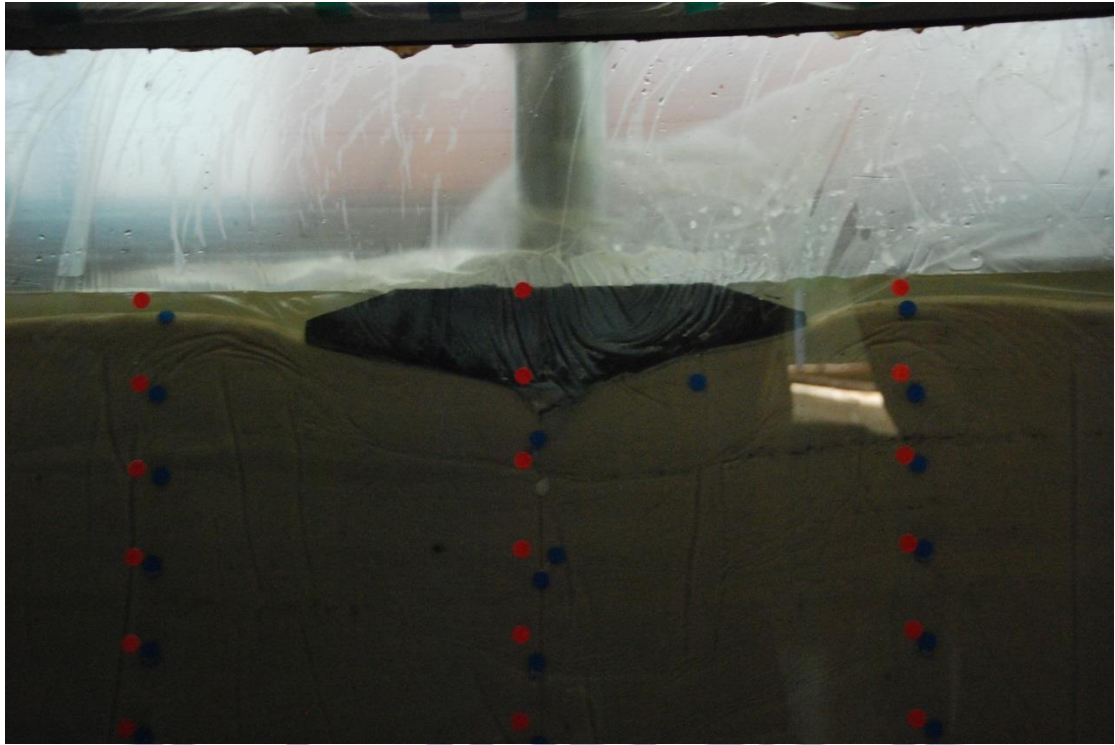


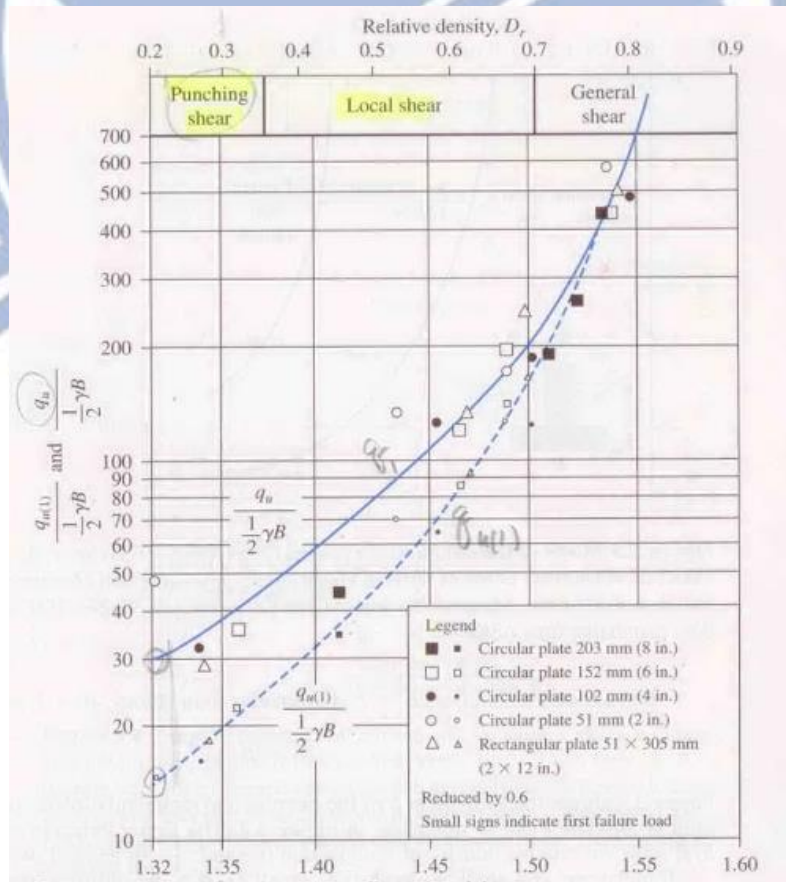
圖 5-20(a) spudcan 貫入達 30 mm



圖 5-20(b) spudcan 貫入達 50 mm



圖 5-21 spudcan 貫入達 100 mm



5-22(a) 相對密度與荷重(Vesic,1963)

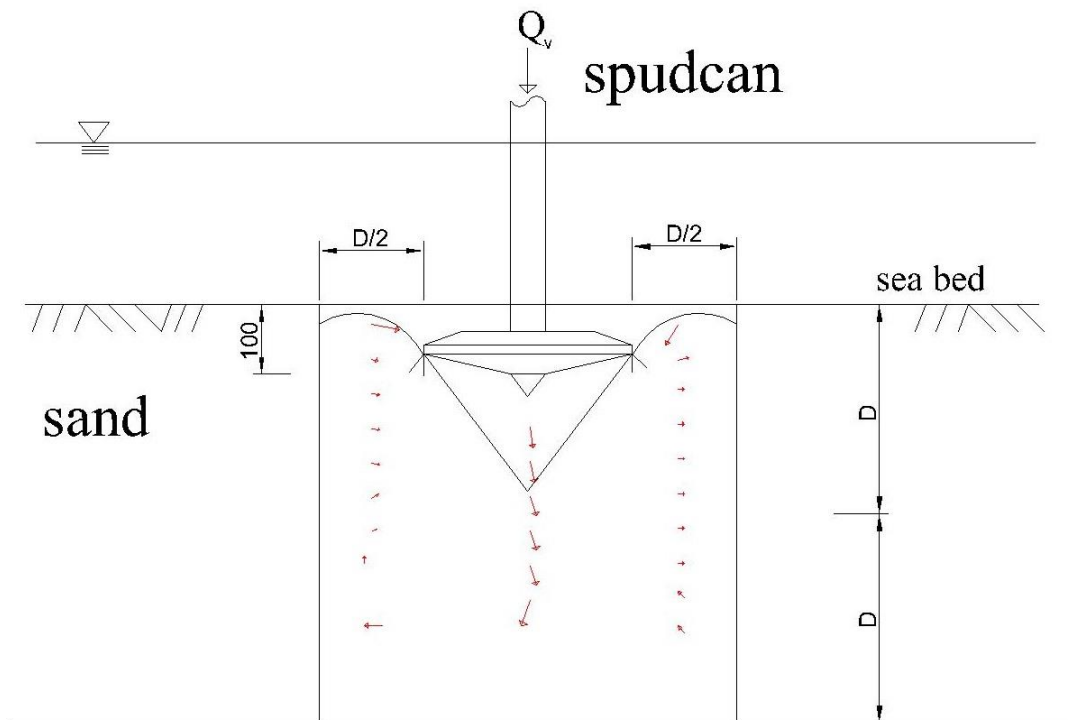


圖 5-22(b) spudcan 貫入達 100 mm 與 Vesic(1973)之 punch shear 破壞模式做比較

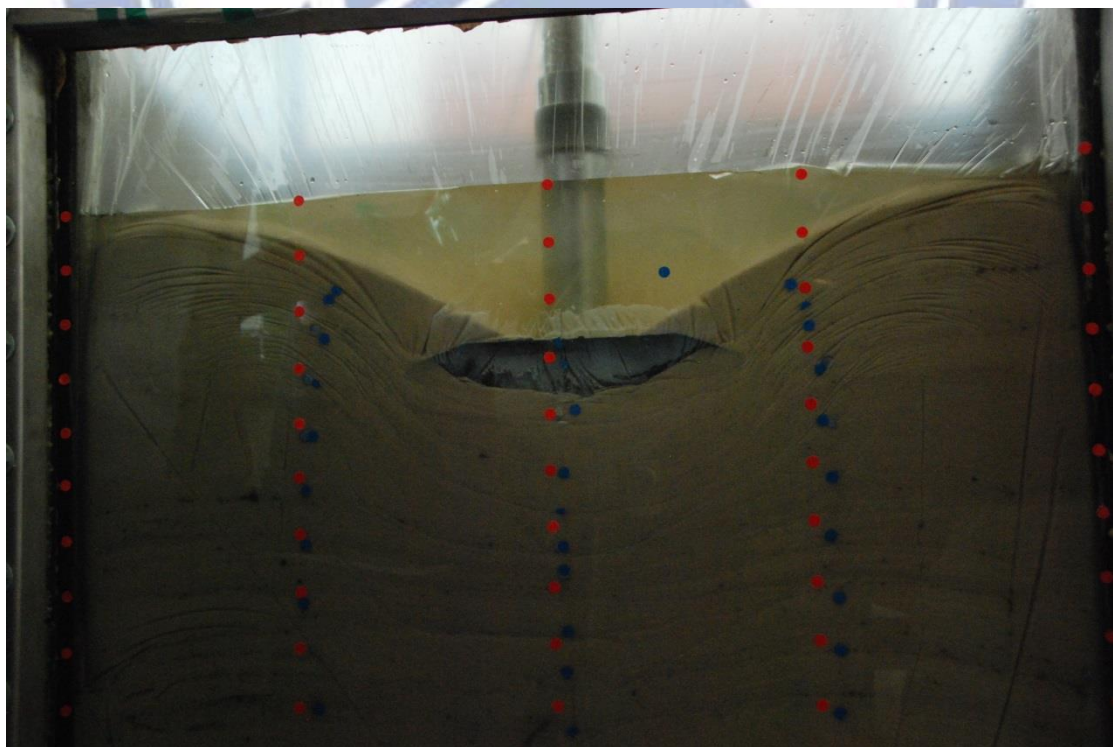


圖 5-23 spudcan 貫入達 150 mm

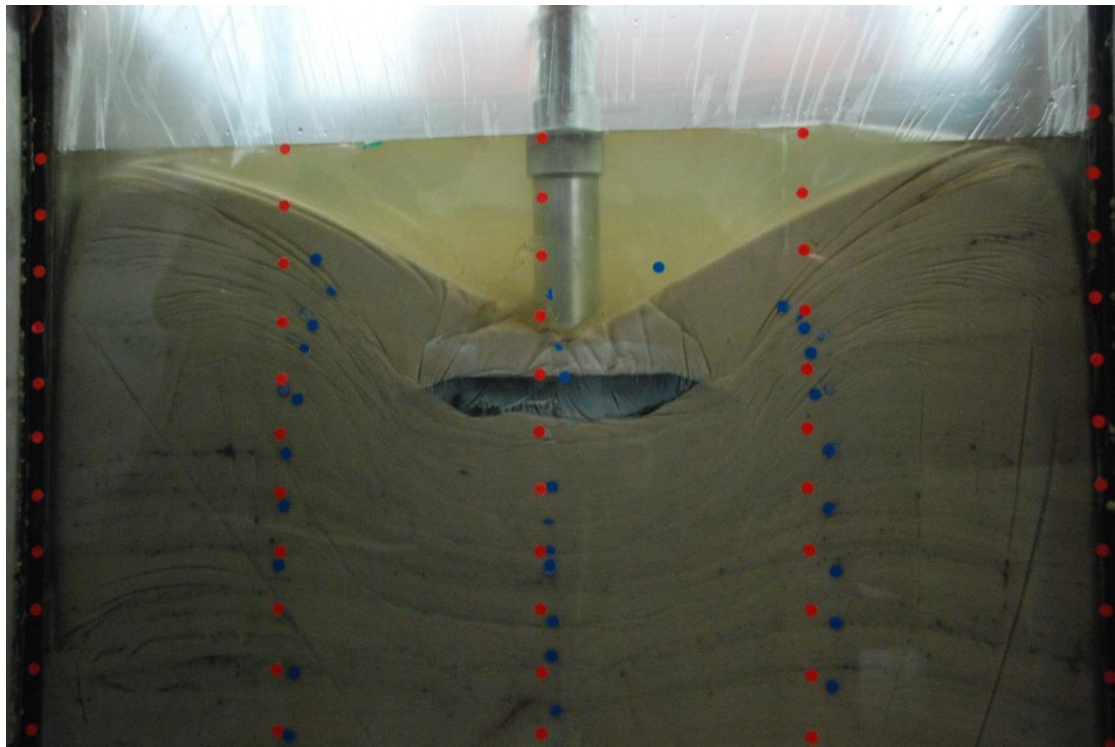


圖 5-24(a) spudcan 貫入達 250 mm

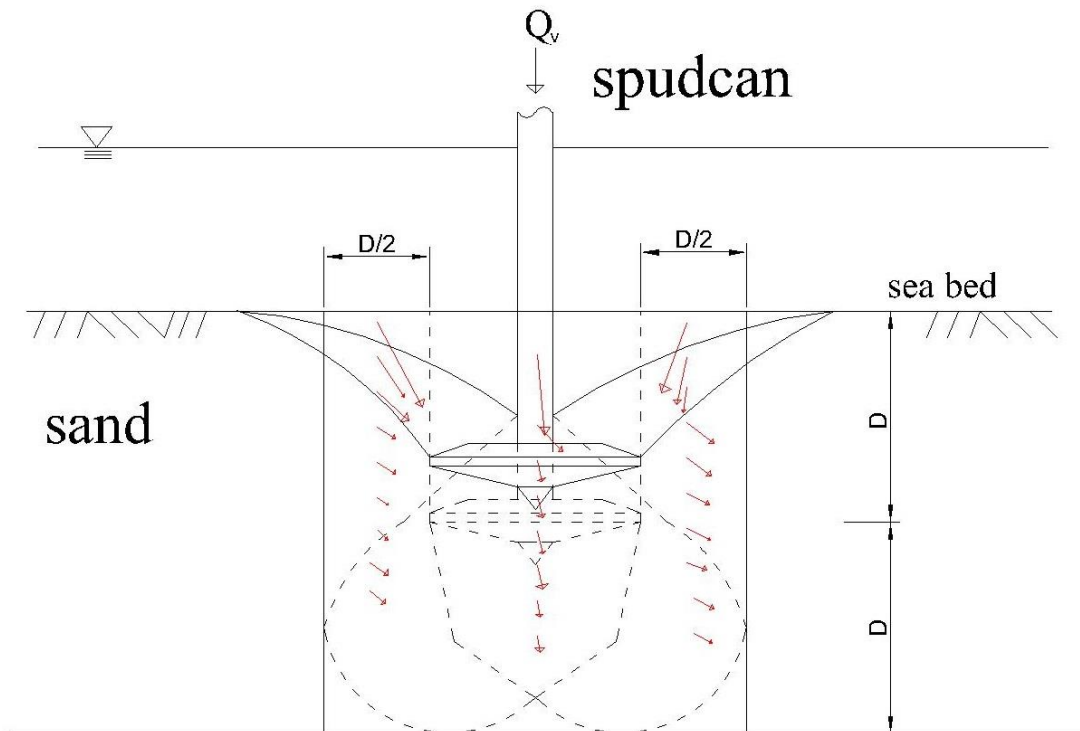


圖 5-24(b) spudcan 貫入達 250 mm 與 Lu (2007)之破壞模式做比較

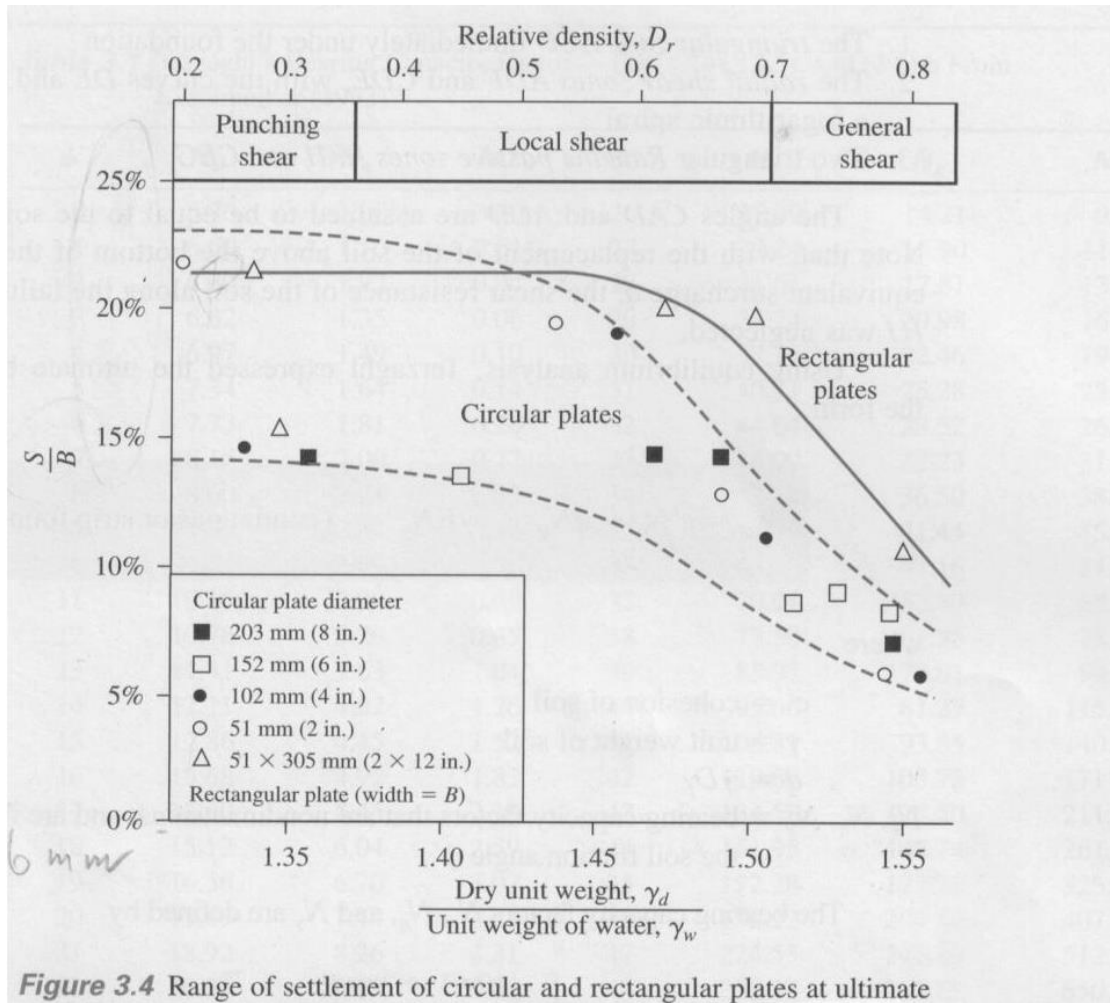


Figure 3.4 Range of settlement of circular and rectangular plates at ultimate

圖 5-25 相對密度與沉陷量關係(Vesic 1963)



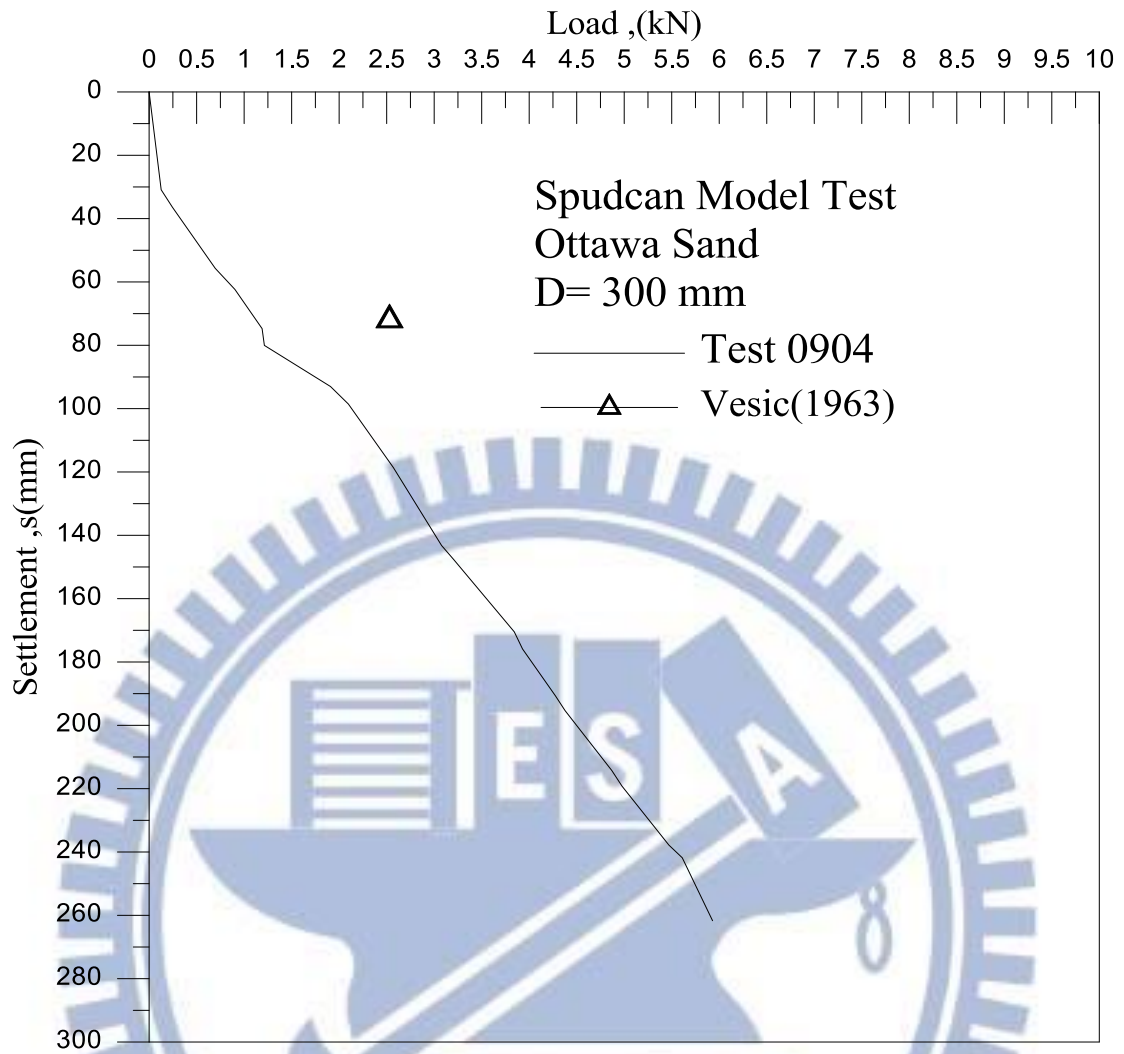


圖 5-26 Spudcan 載重與沉陷關係

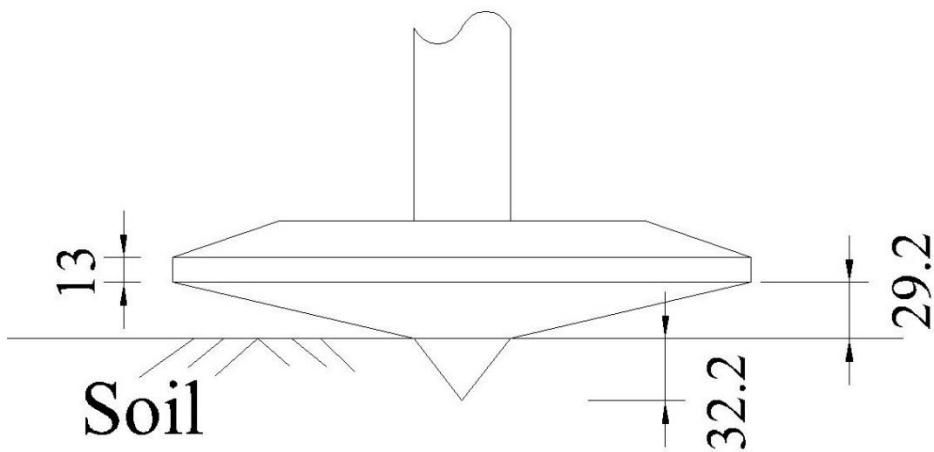


圖 5-27 Spudcan 下側盤體接觸土壤

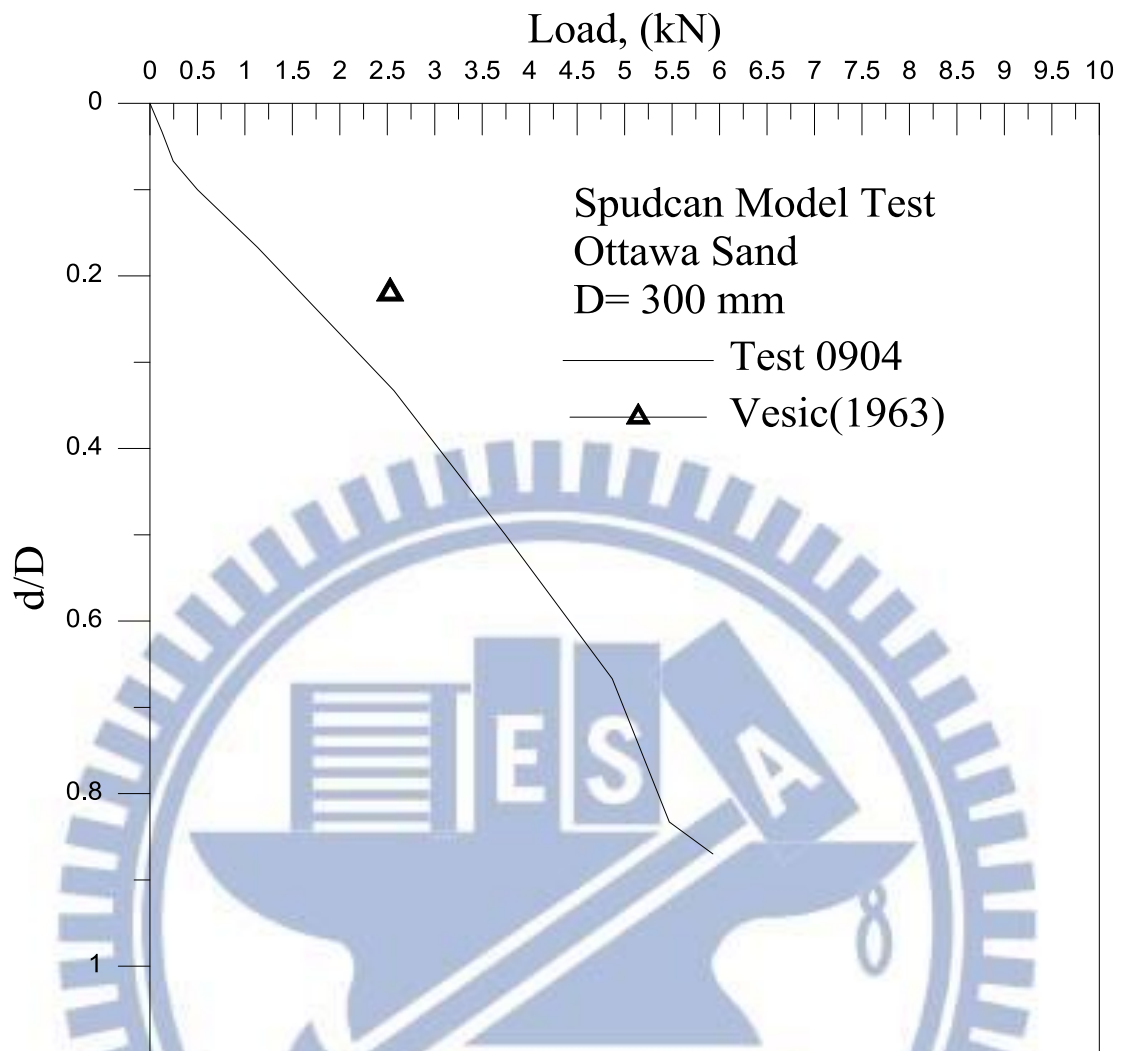


圖 5-28 貫入深度與沉陷關係