

國立交通大學
土木工程學系
碩士論文

壓入式沉箱施工以 NF 膜降低
土層摩擦力之研究

**Reduction of Interface Friction between
Pressed-in Caisson and Soil deposits by
Non-Friction Method**

研究生：翁承劭

指導教授：方永壽 博士

中華民國一〇三年十月

壓入式沉箱施工以 NF 膜降低
土層摩擦力之研究

**Reduction of Interface Friction between
Pressed-in Caisson and Soil deposits by
Non-Friction Method**

研究生：翁承劭 Student：Chen-Shao Wong
指導教授：方永壽 博士 Advisor：Dr. Yung-Show Fang

國立交通大學
土木工程研究所
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

November 2014

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇三年十一月

壓入式沉箱施工以 NF 膜降低 土層摩擦力之研究

研究生：翁承劭

指導教授：方永壽

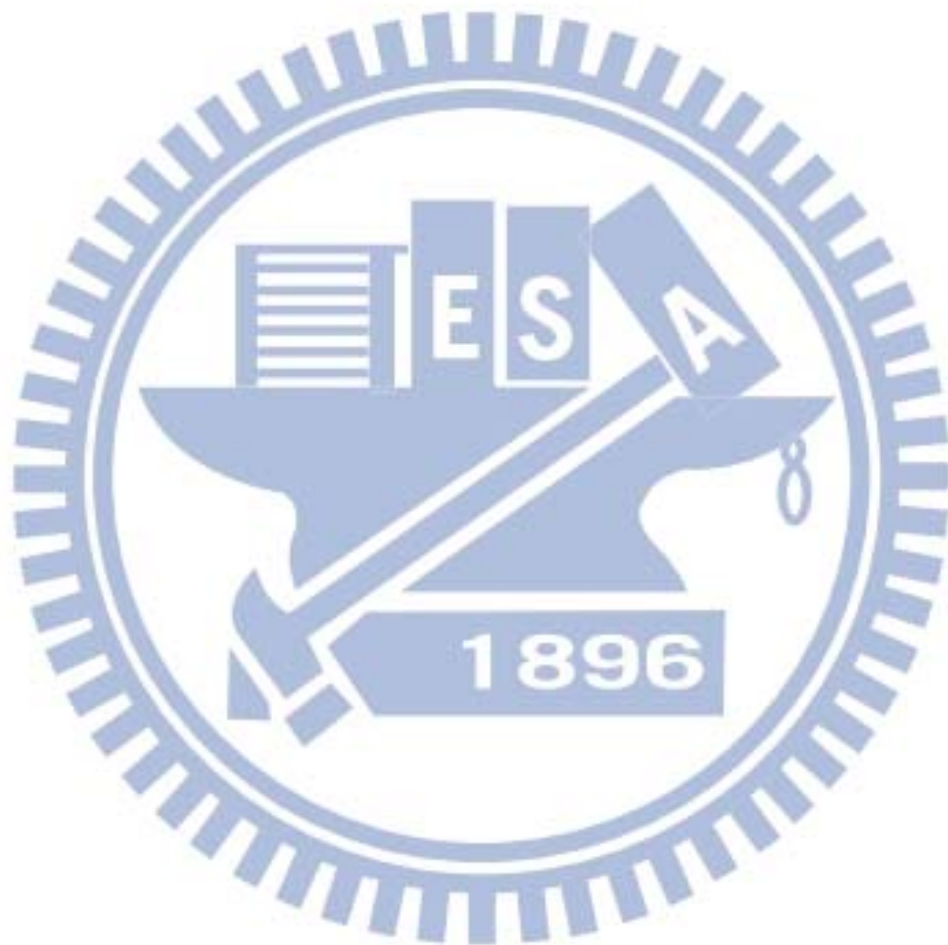
國立交通大學土木工程系碩士班

摘要

本論文以噴氣直剪試驗探討壓入沉箱施工，噴氣壓力大小對降低箱體周面摩擦力之效應。本研究先至施工瞭解現場紀錄壓入沉箱之施工，並採用交通大學直剪試驗儀模擬壓入式沉箱下沉時，箱壁與土壤間的介面摩擦行為。本研究之試驗土樣採取渥太華砂，並以實驗室自拌混凝土模擬箱體材料。透過直剪試驗儀與自行建置之噴流設備，模擬壓入沉箱下沉時採用的兩種輔助工法：NF 工法與噴氣工法。依據沉箱施工現場取回之 NF 膜，配合直剪試驗可以了解 NF 膜對降低沉箱壁體與土壤間介面摩擦力之成效。實驗研究改變空氣壓力 σ_a 與直剪試驗正應力 σ_n 的壓力比 APR (air pressure ratio)，了解施加氣壓大小與引致介面摩擦角 δ 的關係。直剪試驗之結果顯示，使用 NF 膜可以降低混凝土試體與渥太華砂之間的摩擦力。實驗測得混凝土試體與中等緊密砂土的介面摩擦角為 22° ，將平滑鋼片製成之 NF 膜包覆於直剪試驗上盒底部後，得到的混凝土試體與 NF 膜界面摩擦角為 16.7° ，NF 膜的介入使摩擦角下降了 5.3° 。噴氣直剪試驗結果顯示，隨著噴氣壓力的增大(壓力比自 0 增大到 3)，混凝土試體與 NF 膜間的界面摩擦角逐漸減小。界面摩擦角自 16.7° (當 APR=0) 減小到 $\delta = 13.0^\circ$ (當 APR=1)，摩擦角 $\delta = 9.6^\circ$ (當 APR=2)，摩擦角 $\delta = 8.8^\circ$ (當 APR=3)。噴氣直剪試驗結果顯示，當壓力比大於 3.0 (氣壓 σ_a 為正應力 σ_n 的三倍)，界面摩擦角保持下限值 8.8° ， δ 不再隨著壓力比之增大而下降。壓入式沉箱施工現場案例顯示，噴氣工法可有效降低箱體的周面摩擦力。但是於地盤中灌注大量壓縮空氣，可能對周圍地盤造成擾動，

須謹慎使用。

關鍵字：噴氣工法、直剪試驗、界面摩擦力、NF 工法、壓入式沉箱



Reduction of Interface Friction between Press-in Caisson and Soil deposits by NF method

Student : Chen-Shao Weng Advisor : Dr. Yung-Show Fang

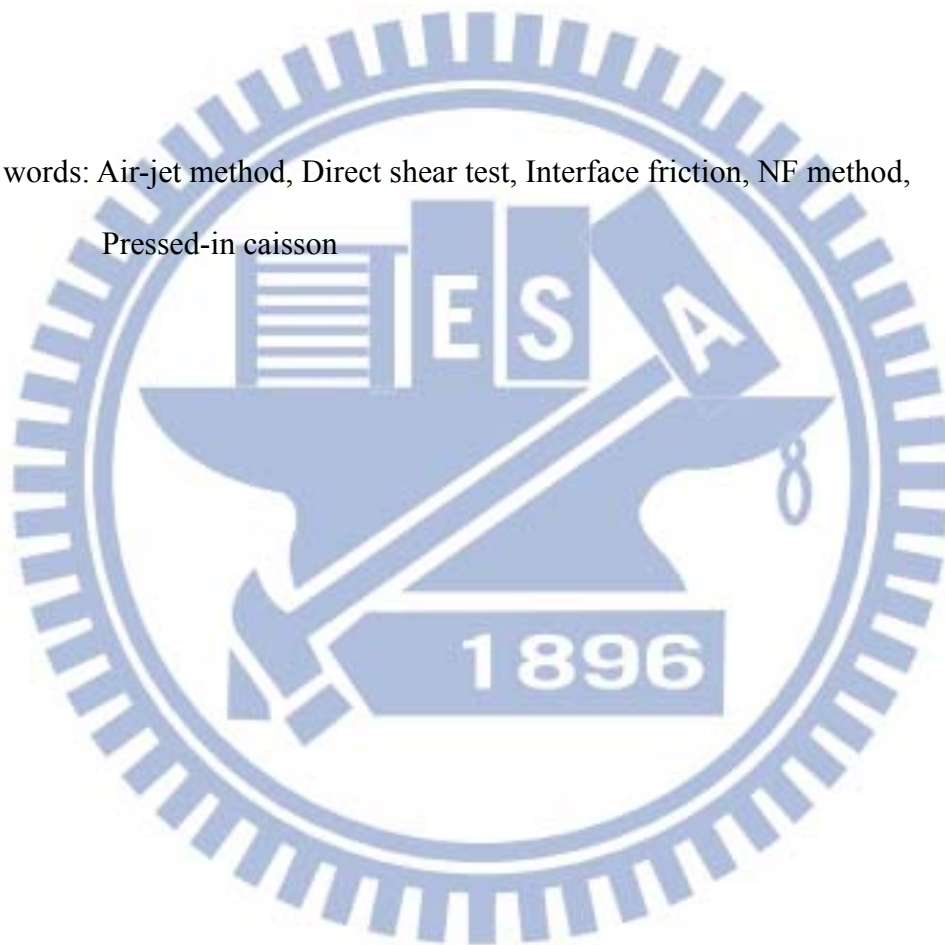
Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

This thesis investigated the reduction of interface friction between the pressed-in caisson and the soil by the air-jet direct shear tests. A special air jet direct shear experiment was designed and constructed at the National Chiao Tung University soil mechanics laboratory to simulate no-friction method(NF) method and air jet method for the construction of a pressed-in caisson. Direct shear tests were used to study the interface friction between concrete sample and Ottawa sand, and the reduction of interface friction angle by the thin steel of NF sheet. The relation between the applied air pressure and the interface friction angle was studied by varying the air pressure ratio(APR). The APR is defined as the ratio of applied air pressure (σ_a) and the interface normal stress (σ_n), during the air-jet direct shear test. Test results indicated that the residual internal friction of the medium dense Ottawa sand($D_r=55\%$) was 31.3° . By using the NF sheet, the interface friction angle between the concrete sample and Ottawa sand was reduced to 22° . By place of the NF sheet between the sand and the concrete sample, the interface angle was reduced to 16.7° . Test results of the air-jet direct shear test indicated that the interface friction angle between NF sheet and the concrete sample was reduced to 12.7° , 9.6° , and 8.8° , corresponding to an APR ratio of 1, 2, and 3 respectively. However, the interface friction angle remain a

constant after the ratio exceeded 3. In other words, an increase of APR beyond 3 has no effect on the friction angle between the concrete sample and the NF plate. The ultimate interface angle was 8.8° . Test results of press-in caisson indicated that the air-jet method could effectively reduce the friction between caisson and soil up to 7.9° . However, pumping compressed air into the ground might have adverse effects to the deposits surrounding the caisson.

Key words: Air-jet method, Direct shear test, Interface friction, NF method,
Pressed-in caisson



誌謝

本篇論文的完成，首先要感謝方永壽老師的在碩班生涯中悉心的指導，無論在待人處事的方法與做學問的態度上，老師一直都是我的典範。同時也要謝謝大地組其他五位老師，潘以文老師、廖志中老師、黃安斌老師、林志平老師與單信瑜老師在碩班求學路上給予的指導。

一路上有太多太多來自貴人的幫助得以完成本篇論文，接下來要謝謝工程的業主願意讓我踏入工地學習並提供寶貴資料，也感謝現場的工地主任及諸多工程師們，他們的在實務方面的經驗與對問題的耐心解釋，縮短了我在現場摸索的時間並填補了課本與實務經驗間的差距，謝謝台灣海壓克公司的副理濱松俊偉先生解答關於壓入工法的相關問題及提供關於工程的相關想法。此外，已經從交大畢業許久的陳學長與葉學長在過程中對學弟的協助，沒有兩位學長，這篇論文與研究也無法順利進行。對於以上提及的人士，在此再次致上萬分的謝意。

研究期間謝謝研究室裡劉政學長、同學慶祐、同心及學弟阿信、小繼、聖麟的協助及提供意見。

謝謝以下的各位讓我有個和別人不同的求學生涯，初屁、張吉吉、大大、驢子、ET、華妹、嚕米、金比白、大雄、咪咪、同慶大哥、阿皓及新竹 Toastamster 的社員。

最後也最重要的，謝謝我的父母、弟妹讓我無後顧之憂地完成碩士的學位，謝謝栽培我長大的舅舅，謝謝女朋友 Melody 的支持與體諒，還有太多因為篇幅而無法提及的人，謝謝大家的幫忙。

翁承劭 2014. 11

目錄

摘要	i
誌謝	v
目錄	vi
表目錄	x
圖目錄	xi
符號說明	xvii
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機與目的	1
1.3 研究方法	2
1.4 論文組織	2
第二章 文獻回顧	3
2.1 沉箱工法	3
2.2 壓入式沉箱工法沿革	4
2.3 壓入式沉箱工法施工原理	5
2.4 反力地錨與千斤頂	7
2.5 壓入式沉箱輔助工法	8
2.5.1 NF 工法	8
2.5.2 噴流工法	8
2.6 壓入式沉箱施工流程	9

2.6.1 前期作業	9
2.6.2 沉箱壓入作業	9
2.6.3 後續作業	10
2.7 沉箱導致的沉陷	10
2.8 地下建築構造物材料與砂土界面摩擦行為研究	10
第三章 沉箱施工案例介紹	11
3.1 高雄楠梓汙水主幹管壓重及壓入式沉箱工作井	11
3.1.1 工程概述	11
3.1.1.1 高雄楠梓汙水主幹管一號沉箱	12
3.1.1.2 高雄楠梓汙水主幹管二號沉箱	12
3.1.1.3 高雄楠梓汙水主幹管三號沉箱	12
3.1.1.4 高雄楠梓汙水主幹管四號沉箱	12
3.1.1.5 高雄楠梓汙水主幹管五號沉箱	13
3.1.1.6 高雄楠梓汙水主幹管六號沉箱	13
3.1.2 地質概況	13
3.1.2.1 一、二號沉箱地質鑽探	13
3.1.2.2 三、四號沉箱地質鑽探	14
3.1.2.3 五、六號沉箱地質鑽探	14
3.1.3 壓重式沉箱施工遭遇困難	15
3.1.4 改採壓入式工法的原因及其施工	17
3.2 蘆洲線 CL700A 區段標壓入式沉箱連絡通道	18
3.2.1 工程概述	18

3.2.2 地質概況.....	18
3.2.3 選擇壓入式工法的原因.....	19
3.2.4 施工對鄰近地盤建物沉陷之影響.....	20
3.3 壓入與壓重沉箱工法之比較.....	20
第四章 高雄壓入沉箱施工案例.....	22
4.1 工程概述.....	22
4.2 沉箱介紹.....	22
4.3 地質概況.....	22
4.4 遮斷壁鋼板樁.....	23
4.5 反力系統.....	24
4.5.1 反力地錨.....	24
4.5.2 油壓千斤頂與竹節形夾具.....	25
4.5.3 支壓盤與加壓桁架.....	25
4.6 沉箱壓入施工流程.....	25
4.6.1 壓入沉箱前置作業.....	26
4.6.2 沉箱鐵腳.....	26
4.6.3 NF 工法.....	26
4.6.4 沉箱箱體構築與壓入作業.....	27
4.6.5 水中開挖作業.....	27
4.6.6 噴氣工法.....	27
4.6.7 後續作業.....	28
4.7 監測系統.....	28

第五章 以直剪試驗探討 NF 工法及噴氣工法	29
5.1 試驗材料	29
5.1.1 試驗土壤	29
5.1.2 混凝土試體	29
5.1.3 NF 膜	30
5.2 直剪試驗儀及空氣噴流系統	30
5.2.1 直剪試驗儀	31
5.2.2 空氣噴流系統	31
5.3 噴氣直剪試驗方法與流程	31
5.4 試驗結果	32
5.4.1 中等緊密渥太華砂之內摩擦角	32
5.4.2 渥太華砂與混凝土之介面摩擦角	33
5.4.3 NF 膜與混凝土介面摩擦角	33
5.4.4 不同噴氣壓力下之 NF 膜與混凝土介面摩擦角	33
第六章 結論與建議	35
6.1 結論	35
6.2 建議	36
參考文獻	37
表	38
圖	49

表目錄

表 2-1 周面摩擦力表.....	38
表 2-2 未使用下沉促進工法之周面摩擦力表.....	39
表 2-3 有使用下沉促進工法之周面摩擦力表.....	40
表 3-1 台灣壓入式沉箱統計.....	41
表 3-2 高雄楠梓汙水主幹管沉箱資料.....	42
表 3-3 聯絡通道施工比較.....	43
表 3-4 高雄楠梓汙水主幹管沉箱施工時間比較.....	44
表 3-5 CL700A 壓入沉箱監測儀器配置.....	45
表 4-1 沉箱下沉所需的壓入力.....	46
表 4-2 壓入沉箱施工周邊監測頻率.....	47
表 5-1 渥太華砂性質.....	48



圖目錄

圖 2-1 壓重沉箱工法.....	49
圖 2-2 穩定液改良沉箱工法示意圖.....	49
圖 2-3 穩定液改良壓重沉箱工法施工圖.....	50
圖 2-4 壓氣沉箱工法示意圖.....	50
圖 2-5 壓入沉箱工法.....	51
圖 2-6 式(2-2)圓形沉箱示意圖.....	51
圖 2-7 地錨連結至竹節形夾棒.....	52
圖 2-8 竹節形夾棒連結至千斤頂.....	52
圖 2-9 油壓千斤頂.....	53
圖 2-10 千斤頂夾具示意圖.....	53
圖 2-11 千斤頂與加壓桁架.....	54
圖 2-12 加壓處鋪砂以均勻承載面之壓力.....	55
圖 2-13 沉箱外側之 NF 膜.....	55
圖 2-14 裝 NF 鐵盒之示意圖.....	55
圖 2-15 安裝 NF 膜鐵盒.....	56
圖 2-16 沉箱壁外拉出之 NF 膜.....	56
圖 2-17(a) 設置箱體內噴流管.....	57
圖 2-17(b) 噴流孔與噴流孔外蓋.....	57
圖 2-18 壓入式沉箱施工流程.....	58
圖 2-19 壓入沉箱施工之前期作業流程.....	59
圖 2-20 沉箱壓入作業.....	60
圖 2-21 上海沉箱沉陷點配置圖.....	61
圖 2-22 沉箱下壓造成水平方向擠土效應.....	62
圖 2-23 沉箱下壓的後續影響.....	62

圖 2-24 乾砂與結構間摩擦力與垂直應力關係圖.....	63
圖 2-25 不同粗糙度的鋼板與砂之摩擦力實驗.....	64
圖 2-26 乾砂與結構材料間剪應力與垂直應力關係圖.....	65
圖 3-1 高雄楠梓汙水主幹管六座沉箱分布位置.....	66
圖 3-2 一號沉箱位置(由東向西攝).....	66
圖 3-3 二號沉箱位置(由東向西攝).....	67
圖 3-4 三號沉箱位置(由東向西攝).....	67
圖 3-5 四號沉箱位置(由東向西攝).....	68
圖 3-6 鋼板樁與千斤頂連接方式.....	68
圖 3-7 五號沉箱位置(由西向東攝).....	69
圖 3-8 六號沉箱位置(由東向西攝).....	69
圖 3-9 鑽探孔位分布圖.....	70
圖 3-10 一、二、三、四號沉箱鑽探柱狀圖.....	70
圖 3-11 五、六號壓入沉箱鑽探柱狀圖.....	71
圖 3-12 三號沉箱施工導致放流管挫曲.....	71
圖 3-13 三號沉箱施工導致鄰近地盤沉陷及路面掏空.....	72
圖 3-14 一、二沉箱施工流程.....	73
圖 3-15 高雄一號沉箱施工現場.....	74
圖 3-16 反力鋼板樁上浮.....	74
圖 3-17 蘆洲線 CL700A 聯絡通道.....	75
圖 3-18 蘆洲線 CL700A 壓入沉箱位置.....	75
圖 3-19 蘆洲線 CL700A 壓入沉箱鄰房保護配置.....	76
圖 3-20 蘆洲線 CL700A 附近鑽探孔位分布與柱狀圖.....	77
圖 3-21 CL700 壓入式沉箱監測儀器配置.....	78
圖 3-22 CL700A 壓入式沉箱周圍沉陷量.....	79
圖 3-23 二號沉箱的不均勻沉陷.....	79

圖 4-1 沉箱剖面圖.....	80
圖 4-2(a) 高雄壓入沉箱 BH21 鑽孔柱狀圖.....	81
圖 4-2(b) 沉箱與地層關係圖.....	82
圖 4-3 於降挖地面上施作地錨.....	83
圖 4-4 反力加壓系統示意圖.....	84
圖 4-5 壓入沉箱反力系統.....	85
圖 4-6 壓入力計算.....	86
圖 4-7 地錨的固定端與自由端示意圖.....	87
圖 4-8 地錨施工流程圖.....	88
圖 4-9 中空油壓千斤頂.....	89
圖 4-10 千斤頂壓入流程圖.....	90
圖 4-11 竹節鋼棒與地錨之連接處.....	91
圖 4-12 沉箱施工壓入流程圖.....	92
圖 4-13 墊木及鐵腳鋪設平面圖.....	93
圖 4-14 墊木鋪設示意圖.....	93
圖 4-15 墊木上的鐵腳.....	94
圖 4-16 沉箱鐵腳處局部放大圖.....	94
圖 4-17 焊在鐵腳上內裝 NF 膜的鐵盒.....	95
圖 4-18 掛於第一層沉箱上的 NF 膜.....	95
圖 4-19 置於沉箱旁之 NF 膜.....	96
圖 4-20 高雄壓入沉箱第二昇層箱體製作(a) 綁紮鋼筋.....	96
圖 4-20 高雄壓入沉箱第二昇層箱體製作(b) 澆製箱體混凝土.....	96
圖 4-21 水中開挖.....	97
圖 4-22(a) 噴流管上預留氣體噴射管道的保麗龍塊.....	98
圖 4-22(b) 箱壁上的噴流孔.....	98
圖 4-23 空壓機與連結到不同昇層的噴流管(a) 空壓機.....	99

圖 4-23 空壓機與連結到不同昇層的噴流管(b) 噴氣管.....	99
圖 4-24 高壓水柱清洗鐵腳(a) 設備吊入水中圖.....	100
圖 4-24 高壓水柱清洗鐵腳(b) 設備近照.....	100
圖 4-25 以水中攝影機確認鐵腳處淤泥清洗完成.....	100
圖 4-26 水中混凝土澆置(a) 沉箱上方鋪設鋼板形成工作平台.....	101
圖 4-26 水中混凝土澆置(b)特密館內以橡皮碗確保混凝土不會於管內與水混 合.....	101
圖 4-26 水中混凝土澆置(c) 以特密管澆置水中混凝土.....	101
圖 4-26 水中混凝土澆置(d) 確認水中混凝土深度.....	101
圖 4-27 沉箱底板施工(a) 底板鋼筋綁紮.....	101
圖 4-27 沉箱底板施工(a) 底板混凝土澆置.....	101
圖 4-28 沉箱監測範圍.....	102
圖 5-1 直剪混凝土製作(a) 混凝土用模具.....	103
圖 5-1 直剪混凝土製作(b) 混凝土用砂.....	103
圖 5-1 直剪混凝土製作(c) 混凝土用水泥.....	103
圖 5-1 直剪混凝土製作(d) 水泥與砂加水拌合.....	103
圖 5-1 直剪混凝土製作(e) 混凝土試體完成.....	103
圖 5-2 附外徑 3mm 銅質噴氣管及噴氣口之混凝土下盒試體.....	104
圖 5-3 模擬噴氣工法直剪試驗混凝土下盒之製作模具.....	104
圖 5-4 直剪試驗噴氣混凝土下盒之製作(a) 混凝土試體之模具.....	105
圖 5-4 直剪試驗噴氣混凝土下盒之製作(b) 混凝土用砂.....	105
圖 5-4 直剪試驗噴氣混凝土下盒之製作(c) 混凝土用水泥.....	105
圖 5-4 直剪試驗噴氣混凝土下盒之製作(d) 水泥與砂加水拌合.....	105
圖 5-4 直剪試驗噴氣混凝土下盒之製作(e) 噴氣混凝土下盒試體完成.....	105
圖 5-5 直剪盒上盒與鑽孔 NF 膜(a) 直剪盒上盒、NF 膜、與強力雙面膠.....	106
圖 5-5 直剪盒上盒與鑽孔 NF 膜(b) 將 NF 膜包覆於直剪盒上盒底部.....	106

圖 5-6 空氣噴流之氣壓馬達設備(a) 空壓機.....	106
圖 5-6 空氣噴流之氣壓馬達設備(b) 第一次調壓.....	106
圖 5-6 空氣噴流之氣壓馬達設備(c) 第二次調壓.....	106
圖 5-7 一般直剪試驗步驟(a) 剪力盒內備製砂土試體.....	107
圖 5-7 一般直剪試驗步驟(b) 蓋上透水石及上蓋板.....	107
圖 5-7 一般直剪試驗步驟(c) 安裝加壓載具.....	107
圖 5-7 一般直剪試驗步驟(d) 安裝測微計及加載垂直荷重.....	107
圖 5-7 一般直剪試驗步驟(e) 以螺柱將上下剪力盒頂開後，開始直剪試驗.....	107
圖 5-8 噴流直剪試驗步驟(a) 置入有埋設噴氣孔之混凝土.....	108
圖 5-8 噴流直剪試驗步驟(b) 蓋上下附 NF 膜之上盒及備製盒內之渥太華砂試體.....	108
圖 5-8 噴流直剪試驗步驟(c) 蓋上透水石及上蓋板.....	108
圖 5-8 噴流直剪試驗步驟(d) 放置垂直荷重加壓載具、水平及垂直位移計並接上空氣噴流管.....	108
圖 5-8 噴流直剪試驗步驟(e) 調整噴流孔之空氣壓力.....	108
圖 5-8 噴流直剪試驗步驟(f) 以螺柱將上下盒頂開後，開始直剪試驗.....	108
圖 5-9 中等緊密渥太華砂剪應力及體積應變隨剪位移之變化.....	109
圖 5-10 中等緊密渥太華砂之破壞包絡線.....	110
圖 5-11 平滑混凝土與渥太華砂界面之剪應力隨剪位移變化.....	111
圖 5-12 平滑混凝土與渥太華砂界面隨剪位移之變化.....	112
圖 5-13 平滑混凝土與 NF 膜界面之應力隨剪位移變化.....	113
圖 5-14 平滑混凝土與包覆 NF 膜之上盒剪應力對正應力關係.....	114
圖 5-15 在不同噴氣壓力下，剪應力隨剪之變化($\sigma_n=30 \text{ kN/m}^2$).....	115
圖 5-16 不同噴氣壓力下，剪應力隨剪之變化($\sigma_n=45 \text{ kN/m}^2$).....	116
圖 5-17 不同噴氣壓力下，剪應力隨剪之變化($\sigma_n=60 \text{ kN/m}^2$).....	117
圖 5-18 不同噴氣壓力下平滑混凝土與包覆 NF 之上盒剪應力對正應力關係.....	118

圖 5-19 界面摩擦角隨氣壓比之變化.....119
圖 5-20 空氣壓力分布示意圖.....120



符號說明

APR: 氣壓與正向應力比值

B: 沉箱壁厚

c: 刃口下方的土壤凝聚力

Cu: 均勻係數

D₁₀: 有效粒徑

D_F: 刃口貫入深度(m)

e_{min}: 最小孔隙比

e_{max}: 最大孔隙比

F: 箱體與土壤間摩擦力

Gs: 比重

L: 沉箱壁體中心線全長

N'_c、N'_q、N'_γ、: 土壤支承係數

P: 油壓千斤頂施加的力

P_刀: 單位面積的地盤抵抗力

Q: 箱體下方刃口處的地盤抵抗力

U: 水浮力

W: 混凝土箱體自重

ΣP_刀: 箱體下方刃口處的地盤抵抗力

δ: 界面摩擦角

φ: 內摩擦角

γ₁、γ₂: 刃口下方的土壤單位重

σ_a: 空氣壓力

σ_n: 正向應力

第一章

緒論

1.1 前言

在地狹人稠的台灣，施工用地取得不易，如何在狹小的空間下進行沉箱直井施工且對周遭建物的影響減為最小，是一土木工程師面對的重大問題。台灣第一起壓入式沉箱為台北捷運蘆洲線 CL700A 標之壓入式沉箱潛盾隧道聯絡通道，並有相關文獻(台北市政府捷運工程局，2008)紀錄其施工過程。但是，此後的其他壓入式沉箱案例(如：高雄污水下水道工作井、台電 161kV 電纜洞道分歧井、台北捷運松山線 CG590 標連絡通道豎井)皆缺乏相關文獻紀錄。因此，本論文完整紀錄一座位於高雄的壓入式沉箱施工，並嘗試以室內直剪實驗模擬，進一步了解壓入過程沉箱壁體與土壤間的界面摩擦行為。

1.2 研究動機與目的

壓入沉箱在壓入過程，須以下壓力(沉箱自重 W 及千斤頂壓力 P)克服刃口處的地盤承载力 Q 、地下水的上浮力 U 、及沉箱壁的周面摩擦力(F)。為使沉箱順利下沉，日本研究人員逐步發展出 NF 工法(Non Friction method)及噴氣工法(Air-jet method)降低沉箱壁的周面摩擦力。NF 工法過去在台灣的沉箱案例曾有成功施工的經驗，施工案例顯示，NF 工法對降低摩擦力有顯著的成效。然而噴氣工法在台灣缺乏相關的施工經驗，國內外研究壓入沉箱案例的文獻亦缺乏探討其作用的機制，及氣壓大小對界面摩擦角之影響。因此本論文除記錄一壓入沉箱的施工過程外，並透過直剪試驗研究 NF 工法及噴氣工法對於降低箱壁摩擦力的機制。

1.3 研究方法

由於 NF 工法與噴氣工法施作時，無法得知在地下深處的實際介面摩擦行為，僅能從油壓千斤頂的力量變化，來推估施作兩種工法降低摩擦力的效果。本論文除記錄現場壓入沉箱施工外，將透過直剪試驗模擬現場沉箱下沉時的界面力學行為。採用壓入沉箱施工現場裁下之 NF 膜，配合直剪試驗儀，模擬 NF 工法降低混凝土壁面與中等緊密(相對密度 $D_r=55\%$)渥太華砂摩擦力的效果。最後以噴氣直剪試驗模擬現場施工時，同時使用 NF 工法與噴氣工法的施工狀況。在直剪正應力 $\sigma_n=30$ 、 45 及 60 kN/m^2 狀況下,透過調整氣壓 σ_a 大小，研究在不同 APR(air pressure ratio $\text{APR} = \sigma_n / \sigma_a$)下，探討噴氣壓力大小對降低摩擦力的效果。

1.4 論文組織

本論文共分六章，第一章為緒論，第二章為文獻回顧，說明沉箱工法、壓入式沉箱工法沿革、施工原理、輔助工法、沉箱施工導致的地盤沉陷、地下建築構造物材料與砂土界面摩擦行為研究。第三章為壓入沉箱工法相關案例介紹，包含：高雄楠梓汙水主幹管壓重及壓入式沉箱工作井、及蘆洲線 CL700A 區段標壓入式沉箱連絡通道，並比較壓入式沉箱工法與壓重沉箱工法之施工品質與工期。第四章為高雄地區壓入式沉箱案例。第五章為室內噴流直剪試驗探討氣壓大小對降低介面摩擦力之效果，第六章為結論與建議。

第二章

文獻回顧

本章介紹沉箱工法及壓入沉箱的相關文獻。本章內容包含：壓入沉箱工法沿革、施工原理、反力地錨與千斤頂、NF 膜及噴氣輔助工法、施工流程、及施工導致之沉陷。

2.1 沉箱工法

依建築物基礎構造設計規範之定義，沉箱基礎係以機械或人工方式分段挖掘地層，以預鑄或場鑄構件逐段構築之深基礎，其分段構築之預鑄或場鑄構件，可於孔內形成，亦可於地上完成後以沉入方式施工。接著再依施工方式的不同形成各種的沉箱工法。李昌國等人(2005)曾就四種常用的沉箱工法進行比較，分別為：(1)壓重沉箱工法、(2)穩定液改良壓重沉箱工法、(3)壓氣沉箱工法、(4)壓入沉箱工法等。以下分別簡單介紹：

(1)壓重沉箱工法

藉由沉箱自重下沉的工法，或在沉箱上方配置加重塊以幫助下壓沉箱，如圖 2-1(a)所示。但此工法時常因下沉力量不均勻，導致沉箱垂直精度欠佳或沉箱傾斜甚至箱體變形，難以修正。此外，為促進箱體下沉，可能因底面土壤過度開挖而導致沉箱底部及周圍土壤掏空，如圖 2-1(b)。

(2)穩定液改良壓重沉箱工法

將穩定液填充於沉箱壁體外與土壤間的空隙，用以穩定開挖面，其概念與連續壁開挖作法相似如圖 2-2 及圖 2-3。其開挖面的穩定取決於穩定液的品質。

(3)壓氣沉箱工法

將壓縮空氣送入沉箱內的作業室，以抑制地下水入滲，穩定開挖面如圖 2-4。但是由於施工作業環境特殊，可能損害施工人員之健康，造成後遺症，因此應用實

例趨少。

以上三者的沉箱皆為自重力沉箱，或者會在沉箱上方加上重量來幫助箱體下沉。但由於是靠重力下沉，容易因地盤的抵抗力不同而與有垂直偏差。

(4) 壓入式沉箱

透過預先打入地下之地錨提供反力，以反力樑及油壓千斤頂強制將沉箱壓入土中，同時在沉箱內進行水中開挖。施工者須注意不得開挖超過沉箱底部之鐵腳，以降低開挖對周圍地盤的擾動。因下沉的過程，各點之下沉量及壓力受到油壓千斤頂控制，施工單位可以透過監測系統與油壓系統來保持沉箱之垂直精度，施工示意圖如圖 2-5。以下各節對壓入式沉箱工法進行更詳細的介紹。

2.2 壓入式沉箱工法沿革

壓入式工法於 1965 年在日本首次施工。為了改善沉箱因自重不足而無法下沉的狀況，施工單位改以千斤頂搭配反力地錨加壓，使沉箱貫入土中。隨著壓入式工法的開發，日本及台灣越來越多使用壓入式沉箱作為衛生下水道主幹管工作井、高壓電纜隧道直井、及捷運隧道之聯絡通道等。角田安一與泉滿明於 1981 年出版的壓入工法的設計與施工(圧入工法の設計と施工)，完整介紹壓入式沉箱工法的設計及施工流程。阪神高速道路公團於 1990 年出版的壓入式開放沉箱的設計指針(圧入オープンケーソンの設計指針)將角田安一與泉滿明(1981)的資料加上 1981 年至 1990 年之間的工程資料與現地數據進行整理，並結合在 1981 年至 1990 年之間開發出的輔助工法：NF 工法(Non-friction method)及噴氣工法，成為目前日本國內壓入式沉箱的設計依據。

台灣於 2006 年，首次使用壓入式沉箱工法建設台北捷運蘆洲線 CL700A 標的潛盾隧道聯絡通道。台灣南部地區第一件採用壓入式沉箱工法的案子為 2010 年之安南～府城 161kV 高壓電纜線安南 P/S 至運河 S/S 段 161kV 地下電纜線路統包工程。接著高雄市有中林路污水主幹管工程，及部分沉箱採用壓入式工法的高雄楠梓汗水主幹管工程。

2.3 壓入式沉箱工法施工原理

壓入式沉箱的特色為，藉由反力地錨及千斤頂將以鋼筋混凝土製的沉箱強制壓入地盤土壤後，再於沉箱內進行開挖作業。因為箱體是受到千斤頂下壓，在控制的狀況下均勻沉陷，不必為促進沉箱下沉而超挖箱底土壤。降低因超挖沉箱內部土壤造成箱體外面土壤的位移，進而降低因沉箱施工對周遭地盤的影響。

相較於傳統沉箱工法，必須考慮地盤反力、地下水位、箱體與土壤間的摩擦力及沉箱自重外，壓入式沉箱還多了一組油壓千斤頂設備。關於沉箱受力計算台北捷運(2008)「壓入沉箱工法設計與施工」建議以下列式 2.1 進行設計：

$$(P + W) > (Q + F + U) \quad (2.1)$$

P：油壓千斤頂施加的力

W：混凝土箱體自重

Q：箱體下方刃口處的地盤抵抗力

F：箱體與土壤間摩擦力

U：水浮力

其中的 P、W 都是人為的變數，而 F、Q、U 需藉由地質調查，加上過去施工經驗進行評估。

2.3.1 地盤抵抗力估算

關於沉箱鐵腳刃口處的地盤抵抗力，在角田安一與泉滿明的書「壓入工法的設計與施工」一書曾分別進行建議，書中提到地盤抵抗力為 $\sum P_{\text{刃}}$ ，該公式如式(2.2)，參考圖 2-6：

$$\sum P_{\text{刃}} = P_{\text{刃}} BL \quad (2.2)$$

$\Sigma P_{\text{刃}}$ ：箱體下方刃口處的地盤抵抗力(tf)

$P_{\text{刃}}$ ：單位面積的地盤抵抗力(tf/m²)

B：沉箱壁厚(m)

L：沉箱壁體中心線全長(m)，

其中 $P_{\text{刃}}$ 建議參考 Terzaghi 於 1943 年提出之條形基腳極限承载力(ultimate bearing capacity)公式來求得，該公式如下：

$$P_{\text{刃}} = cN_c + (\gamma_2 \cdot D_f)N_q' + \frac{1}{2}\gamma_1 B'N_\gamma' \quad (2.3)$$

c：刃口下方的土壤凝聚力(kN/m²)

γ_1 、 γ_2 ：刃口下方的土壤單位重(kN/m³)

B'：沉箱壁厚(m)

D_f ：刃口貫入深度(m)

N_c' 、 N_q' 、 N_γ' 、：土壤支承係數

2.3.2 沉箱壁體與周圍土壤摩擦力估算

在沉箱沉降的過程中，除須考慮刃口處的抵抗力外，尚須考慮沉箱壁體與周圍土壤的摩擦力。自壓入式沉箱工法被開發以來，摩擦力的值一直都由過去施工所獲得的經驗值及現地試驗來進行推估。在角田安一與泉滿明的書中提到，周面摩擦力的值隨著沉箱的材質、地質材料、深度及降低摩擦力工法的有無，會有很大差異。沉箱外土壤的強度也會直接影響周面摩擦力的大小。因此，在評估壁體與周圍土壤的摩擦力時，在未採用 NF 模及噴流工法狀況下，角田安一與泉滿明建議直接以表 2-1 的經驗值進行評估。

阪神高速道路公團「設計指針」一書，對於周面摩擦力評估分為未使用輔助工

法的摩擦力值、與有使用輔助工法的摩擦力值，如表 2-2 及表 2-3 所示。在未使用 NF 工法狀況，除參考角田安一與泉滿明書中的經驗值外，在表 2-2 中，亦可參考道路橋示方書中的摩擦力值與在魚崎浜工區、及助松工區所測得之實驗值。在使用 NF 膜輔助工法的情形下，「設計指針」綜合 NF 工法型錄之建議值、日本於各個不同工區以現地試驗所得之實測值，來歸納出一有使用輔助工法之沉箱周面摩擦力推薦值，供工程界參考使用。

在表 2-2 與表 2-3 中可以發現，設計指針對未採用輔助工法的介面摩擦力值只與土壤的性質有關、而與深度無關。而對有採用輔助工法的沉箱與土壤介面摩擦力值僅跟深度有關係。

2.3.3 上浮力估算

因為沉箱的施工過程中會抓掘沉箱內部的土壤，為平衡內外土壓以避免上舉與砂湧的可能，會保持沉箱內部的水位於地下水水位面以上，所以在估計上浮力時會以沉箱貫入地下水水位以下的體積來做估計的來源。

2.4 反力地錨與千斤頂

設置地錨之用意在提供向千斤頂下壓入箱體所需的反作用力，因此壓入式沉箱所使用的地錨為摩擦型的地錨。在打入地錨時會要求漿液滿至地表，因此地錨可提供反力的長度為整隻地錨的長度。然而在沉箱壓入的過程中，地錨周遭的土壤會因沉箱的下沉而受到擾動，喪失其部分的摩擦力，因此保守估計將地表至箱體底部之地錨假設為自由端無法提供拉力。因此錨定段的位置乃是從箱體底部開始往下算起。角田安一與泉滿明(1981) 也提到類似的概念，地錨因長期處於拉扯及沉箱施工的狀況，最終的抗拉拔力無法直接判斷，還是要依據拉拔試驗來確定。

地錨的支承反力，由夾片傳至特殊的竹節狀夾棒再傳至油壓千斤頂，可參考圖 2-7 及圖 2-8。沉箱箱體的下壓，由特殊的中空千斤頂(圖 2-9)，藉著千斤頂下施加壓

樑將箱體壓入土層。上部夾具與下部夾具輪流固定(圖 2-10)可避免因巨大力量而造成千斤頂夾具脫落引發危險。在千斤頂與沉箱間除了加壓樑外，可依現場需要增加加壓桁架(如圖 2-11)，並於沉箱與壓樑間增加一承壓板或鋪砂，以均佈承載面，如圖 2-12。

2.5 壓入式沉箱輔助工法

本節將逐一介紹壓入式沉箱的輔助工法，包含 NF 工法及噴流工法。

2.5.1 NF 工法

NF 工法為在沉箱外圍與地盤接觸界面，鋪設韌性強且柔軟易滑動之鋼膜片(如圖 2-13)，以降低箱體壓入地盤時之摩擦力。台北市政府捷運工程局(2008)在”壓入沉箱工法設計與施工”中提及，原本沉箱外圍混凝土壁面與周圍地盤接觸所產生之摩擦係數約為 0.5(界面摩擦角 $\delta=26.6$ 度)。在鋪設 NF 膜後，箱體外側接觸地盤的是光滑的鋼質 NF 膜，因此界面摩擦係數降低為 0.25(界面摩擦角 14.0 度)。沉箱壓入地盤的摩擦力因加入 NF 膜而有效降低，因此沉箱壓入施工對於周圍地盤之擾動，及對鄰近建物之影響也隨之降低。

NF 膜設置的方式為在鐵腳外側上方凹槽內安置一內裝 NF 膜的鐵盒，NF 鐵盒構造請參考圖 2-14，NF 膜鐵盒安裝位置請參考圖 2-15。沉箱開始下沉時，將 NF 膜自盒中拉出一段長度後暫時至於沉箱外(如圖 2-16)，讓上方的 NF 膜隨著沉箱下沉而被往下帶。直到 NF 膜被土層與沉箱壁夾住後，不再將上方的 NF 膜往下帶，而改從下方的鐵盒逐漸拉出 NF 膜時，即可裁去上方多餘之 NF 膜。

2.5.2 噴流工法

噴流工法的目的在降低箱體下沉時的摩擦力。噴流工法為設置直徑 25mm 之 PVC 管於刃口及各昇層箱體內部，並將噴流孔預留沉箱外側。藉著在箱壁上預留的孔洞將氣體噴出，以降低箱體與 NF 膜介面之摩擦力，如圖 2-17 所示。在壓入沉箱過程

中，必要時於噴流管內施加 $7\sim 10\text{ kgf/cm}^2$ 噴射空氣，以降低箱體與土層之周面摩擦力。噴流管除可於壓入時使用壓縮空氣外，亦可作為注入穩定液之注入孔，當箱體定位後，可運用噴流管進行背填灌漿，以固定箱體。在地盤注入大量壓縮空氣，有可能對沉箱四周土層造成擾動，在都會地區須配合監測系統謹慎使用。

2.6 壓入式沉箱施工流程

壓入式沉箱的施工可分為三個階段，分別為：前期作業、沉箱壓入作業、及後續作業。壓入沉箱之流程如圖(2-18)所示。

2.6.1 前期作業

壓入式沉箱施工前期作業流程可參照圖 2-19，現場的前期作業包含先打設遮斷壁鋼板樁，以降低沉箱下壓施工對周遭環境的影響。接下來為整地與回填，以供機具進場。待整地完畢後，開始打設反力地錨，接著在地面鋪設墊木，以準備吊放刃口至定位進行組裝。

2.6.2 沉箱壓入作業

沉箱壓入作業流程可參照圖 2-20，當刃口吊放至定位開始組裝後，即開始沉箱的壓入作業。刃口組裝完畢後，在刃口鋼板內部澆注混凝土，接著開始構築沉箱第一昇層的內外模板，然後澆注第一昇層箱體混凝土。養護混凝土，使其的強度達一定程度時，開始進行壓入設備的組裝。之後就是下沉的作業，在下沉作業的同時逐一抽出放置於刃口下方的木墊板，當第一昇層沉箱以千斤頂壓入地盤下沉至預定位置後拆除壓入設備，開始構築第二昇層的箱體。此後便進入反覆作業流程，構築沉箱軀體，養護到一定強度後開始安裝壓入設備，沉箱下沉至預定位置。在拆除壓入設備前，會對沉箱施加大於下一節沉箱自重的力作為預壓後，再拆除壓入設備。以上步驟會持續到沉箱壓入至設計深度後，拆除壓入設備，便完成沉箱的壓入作業。

2.6.3 後續作業

在沉箱下沉至預定深度後，進行沉箱底部及刀口的淤泥清除作業，以確保不會因刀口上的淤泥，造成沉箱底部水路而發生漏水的現象，接著於箱底澆注水中混凝土，並視沉箱的功能施作永久底板或一次工作底板，至此壓入式沉箱的作業告一個段落。

2.7 沉箱導致的沉陷

由於沉箱在壓入過程中可能對周遭地盤產生影響。徐鵬飛等人(2014)研究某一先後使用吸入式與壓入式的混合沉箱施工，透過佈置沉陷點與傾度管如(圖 2-21)發現沉箱在下沉時會對周遭土壤造成遠離沉箱水平位移(擠土效應，如圖 2-22)。該研究說明，當沉箱在壓入的初期對周遭的影響以水平方向擠土效應為主，當沉箱下降到一定深度(H=17.3m)後，深度 8m 以上之土壤繼續水平方向遠離沉箱，然而深度 10m 以下的土層則向著沉箱水平位移。

2.8 地下建築構造物材料與砂土界面摩擦行為研究

Potyondy (1961)進行一系列關於砂土與不同的結構物材料(如木頭、鋼片、混凝土等)界面的摩擦力研究。Potyondy 透過室內實驗發現，影響不同材料與砂土間界面摩擦力的二大因素分別為：(1)砂土的溼度；(2)材料本身的粗糙度。不同結構物材料在相同垂直應力作用下，Potyondy 發現當結構物材料的界面越粗糙時，砂土與結構物材料的摩擦力也越大，實驗結果如圖 2-24

而 Hu 和 Pu (2004)以不同粗糙度的鋼片進行直剪試驗也發現當壓力相同時，鋼片粗糙度(Relative Interface Roughness, R_n)越高摩擦力也越大，實驗結果如圖 2.26。而張崇義(1989) 的研究顯示同一種材料(例如混凝土或鋼材或木材)，其平滑與粗糙度不同，測得的摩擦角亦有所差異，其結果如圖 2-25 所示。

第三章

沉箱施工案例介紹

本章介紹台灣地區的陸上沉箱施工案例。台灣自 2006 年引進壓入沉箱工法後至 2014 年為止，壓入式直井共 10 座，其中兩座位於台北、一座位於台南、七座位於高雄，如表 3-1 所示。以下介紹高雄楠梓汙水主幹管壓重及壓入式沉箱工作井、及台北捷運蘆洲線 CL700A 區段標以壓入式沉箱建造潛盾隧道連絡通道，並比較壓重沉箱工法與壓入沉箱工法的不同。

3.1 高雄楠梓汙水主幹管壓重及壓入式沉箱工作井

本節介紹高雄楠梓汙水主幹管工程，其中包含六座沉箱，分別為四座壓重沉箱以及兩座壓入式沉箱。以下說明各沉箱的工程概述、地質狀況，壓重式沉箱施工遭遇困難及改採壓入式工法的原因及其施工。

3.1.1 工程概述

本工程為興建高雄市楠梓汙水下水道系統建設計畫案，主要內容為投資興建平均日汙水處理至少 75,000 CMD 之二級汙水處理廠、及高雄市部分汙水下水道主次幹管及分支管網。本論文主要介紹在主幹管工程的工作井部分。由於本工程包含六座沉箱，以下分別編號為一到六號，其中一到四號為壓重式沉箱，編號五、六為壓入式沉箱，如表 3-2 所示。本工程六座沉箱分布範圍自高雄市楠梓區德明路高雄市立楠梓特殊學校以西至楠梓區德明路與外環西路交叉口(見圖 3-1)，鄰近楠梓加工出口區。德明路寬約 40 公尺，為高雄市楠梓區的主要幹道，於尖峰時段車流量較大，汙水主幹管及沉箱施工須注意交通的維持

3.1.1.1 高雄楠梓汙水主幹管一號沉箱

一號沉箱為內徑長 6.2 公尺、寬 4.4 公尺，壁厚 0.8 公尺，深度 21.03 公尺的沉箱，以壓重工法分 6 層施作。一號沉箱位於德明路南側安全島旁，如圖 3-2 所示。由圖 3-2 可知，於一號沉箱北側有一座樓房，因此在沉箱下沉開挖時，須密切注意建物的安全監測。

3.1.1.2 高雄楠梓汙水主幹管二號沉箱

二號沉箱為一內徑長為 4.4 公尺、寬 4.4 公尺、壁厚 0.6 公尺、深度 22.75 公尺之壓重式沉箱，分七層施作。基地位置位於德民路與德民路 356 巷交叉口(如圖 3-3)。二號沉箱因旁邊即為加工出口區側門，上下班時出現車潮，須避免在尖峰時段施工，以避免阻塞交通。

3.1.1.3 高雄楠梓汙水主幹管三號沉箱

三號沉箱的內徑長 6.2 公尺、寬 4.4 公尺，壁厚 0.8 公尺，開挖深度 23.65 公尺的壓重式沉箱，分七層施作。三號沉箱的位置位於德民路與德民路 400 巷的交叉口(如圖 3-4 所示)，在北側的安全島旁。因沉箱北側有一座大樓，在沉箱開挖與下沉時需注意大樓的沉陷。

3.1.1.4 高雄楠梓汙水主幹管四號沉箱

四號沉箱為內徑長寬皆為 4.4 公尺，壁厚 0.6 公尺，開挖深度 24.5 公尺的壓重式沉箱，共分 7 層施作。施工位置位於德民路與外環西路路口的快車道上(圖 3-5)，施工時需考慮機具的旋轉半徑以避免影響通過車輛。另外，施工地點的南北側皆有建築，在沉箱的開挖與下沉期間須注意建物的沉陷。

3.1.1.5 高雄楠梓汗水主幹管五號沉箱

五號壓入式沉箱內徑長 6.2 公尺、寬 4.4 公尺，壁厚 0.8 公尺，沉箱深度為 18.4 公尺，為分五層施作之鋼筋混凝土沉箱。千斤頂下壓之反力來源為兩排鋼板樁，採用 17 支打入地下 16 公尺的鋼板樁，鋼板樁與反力千斤頂的銜接方式如圖 3-6。五號沉箱位於高雄德明路南側，高雄楠梓特殊學校北側外牆的人行道上，如圖 3-7。因沉箱緊鄰著學校北側圍牆，而且德明路下方埋設台電及工業汗水幹管等重要管線，施工時需特別注意周圍的地盤狀況及地下管線。

3.1.1.6 高雄楠梓汗水主幹管六號沉箱

六號壓入式沉箱位於德明路與海專路交叉口(圖 3-8)，為一內徑長寬皆為 4.4 公尺，壁厚 0.8 公尺，開挖深度為 21 公尺的矩形沉箱，採用壓入式工法分 6 層施作。反力來源與五號沉箱相同，為兩排共 17 支鋼板樁，每支長度 16 公尺。六號沉箱附近有國立高雄海洋科技大學及高雄楠梓特殊學校，於尖峰時段出現大量車流，可能會造成施工車輛的進出不順，施工時需考慮機具及車輛的進出時段。

3.1.2 地質概況

本次工程之地質主要以粉土質砂(SM)與砂質粉土(CL)為主。詳細的鑽孔位置與鑽孔柱狀圖可參照圖 3-9、圖 3-10、圖 3-11。施工設計時一、二號沉箱使用同一鑽探資料，三、四號沉箱使用同一鑽探資料，五、六號沉箱使用同一鑽探資料。

3.1.2.1 一、二號沉箱地質鑽探

第一、二號沉箱之鑽探結果，如地質鑽探柱狀圖 3-10 所示：

1. 第一層：回填土，厚度 2 公尺。

2. 第二層：粉土質細砂(SM)，厚度 9.6 公尺，SPT-N 值為 11。
3. 第三層：砂質粉土/粉土質黏土(ML/CL)，厚度 1.7 公尺，STP-N 值為 7。
4. 第四層：粉土質黏土(CL)，厚度 3.6 公尺，SPT-N 值為 5。
5. 第五層：砂質粉土(ML)，厚度 2.4 公尺，SPT-N 值為 13。
6. 第六層：粉土質細砂(SM)，厚度 3.8 公尺，SPT-N 值為 17。
7. 第七層：粉土質黏土(CL)，鑽探於地下 25 公尺為止，故此層厚度未知，SPT-N 值為 13。

3.1.2.2 三、四號沉箱地質鑽探

第三、四號沉箱之鑽探結果，地質鑽探柱狀圖如圖 3-10：

1. 第一層：回填土，厚度 1.2 公尺。
2. 第二層：砂質粉土/粉土質黏土(ML/CL)
3. 第三層：粉土質細砂(SM)，厚度 11 公尺，SPT-N 值約為 10。
4. 第四層：粉土質黏土(CL)，厚度 1.8 公尺，SPT-N 值為 5。
5. 第五層：砂質粉土(ML)，厚度 2.5 公尺，SPT-N 值為 9。
6. 第六層：砂質粉土/粉土質黏土(ML/CL)，厚度 1.5 公尺，SPT-N 值為 12。
7. 第七層：砂質粉土(ML)，厚度 2.8 公尺，SPT-N 值為 12。
8. 第八層：粉土質黏土(CL)，鑽探於地下 25 公尺處終止，因此其厚度未知，SPT-N 值為 13。

3.1.2.3 五、六號沉箱地質鑽探

第五、六號沉箱之鑽探結果，地質鑽探柱狀如圖 3-11 所示：

1. 第一層：回填土，厚度 1.1 公尺，SPT-N 值為 6。
2. 第二層：粉土質細沙(SM)，厚度 5.6 公尺，SPT-N 值為 12。

3. 第三層：粉土質黏土(CL)，厚度 0.8 公尺，SPT-N 值為 5。
4. 第四層：砂質粉土(ML)，厚度 4.2 公尺，SPT-N 值為 16。
5. 第五層：粉土質細砂(SM)，鑽探於 23 公尺處終止，因此厚度未知，SPT-N 值為 20。

3.1.3 壓重式沉箱施工遭遇困難

高雄楠梓汙水主幹管三號沉箱，曾兩次在施工期間因坑底砂湧導致周圍地層沉陷。本節敘述災變過程與應變措施。

案例一

1. 事件發生經過：

於 2007/10/05 晚上 7 時，在例行巡查照明設備時發現：三號沉箱工地周圍 3 公尺內的路基下陷 1.8 公尺，造成鄰近仁大海洋中心放流管挫曲，並影響仁大工業區與楠梓加工區的廢水排放，如圖 3-12。

2. 事件發生原因：

事後檢討時發現，發生下陷時沉箱正在進行第六階的沉降(17.7~21.1 公尺)，疑似因不當抽排水而導致沉箱的坑底砂湧，而致使周圍地盤下陷引致路基被掏空。

3. 應變處理過程：

在晚間 7:00 發現鄰近路基下陷後，施工單位立即召集人員進行原因探討。同時進行現場搶修、指揮、回報及監控，並召集相關單位探討後續處理辦法，以阻止災害擴大。晚間 7:20 工作井南側有發現異常滲水，立即通知仁大海洋放流中心停止排放廢水，仁大海洋放流中心派員確認後立即通知停水。

當天晚間 8:30，仁大海洋放流中心人員到達現場，邀集相關單位到場會勘並檢視放流管管件受損情形，同時施作臨時擋土支撐及挖除管件周圍覆土。

於隔日(2007/10/6)凌晨 3:00，施工單位緊急調援鋼軌樁及鋼板，並於 6:30 開始受損管件開挖作業。上午 10:00 邀集管件施工及材料廠商確定損壞部分，但因管件尺寸特殊無現貨可供維修，經討論後決定在下午 1:00 先行回填避免坍塌範圍擴大。

2007/10/8 早上 8:00，重啟開挖並移除損壞之管件，晚上 6:00 開始進行管件的汰換作業，工程持續至隔天早上(2007/10/9)5:00 完工。

案例二

1. 事件發生經過：

事件發生於 2007/11/02，當時正在進行三號沉箱坑底清理作業，疑似因打設之水中混凝土品質不佳造成坑底砂湧。三號沉箱鄰近土壤位移，再次導致德民路路基掏空、仁大海洋放流中心之海洋放流管挫曲折損，影響仁大工業區與楠梓加工區的廢水排放作業，如圖 3-13。

2. 原因分析：

在 2007/11/2 進行抽乾坑內注水，清理坑底淤泥時，疑似水中打設混凝土底板包泥劣化破損，造成坑底砂湧，引致工作井四周路基地盤下陷，造成仁大海洋放流中心之放流管挫曲受損。

3. 應變處理過程：

於 2007/11/02 上午 10:00 進行工作井坑內排水時，發現工作井南側擋土鋼板接縫湧水，疑似仁大海洋放流中心之海洋放流管折損導致排放水湧出。同時距沉箱三公尺內的路面開始下陷，隨即通報負責人進行緊急應變措施。

上午 10:10 時，經場勘後，於工作井南側發現異常滲水，經研判後，立即調度水車於坑內注水於地下水位(地表下 8.5 公尺)以上一公尺。同時通知仁大海洋放流中心停止排放廢水。於上午 10:20 時封閉德惠路至外環西路間的德明路西行車道，

避免地盤下陷範圍擴大而影響行車安全。

於下午 3:30 時調援鋼軌樁及鋼板，在工作井四周進行低壓背填灌漿，直到隔天下午 3:30，接著在下午 6:30 進行受損管件開挖作業。

在 2007/11/03 早上 8:30，邀集前海放管施工及材料廠商至現場確定損壞部分，在同日下午 2:00 進行管件汰換作業，至夜間 11:00 完成全部受損管件修復，同時間通知仁大海洋流放中心進行通水。

2007/11/04 重新滾壓並回填沉箱四周路基，完成工作井北側機慢車道瀝青混凝土路面修復，並開放通行。隔日下午 3:00 完成西行線快車道瀝青混凝土鋪面修復，並於 2007/11/06 恢復通行。

3.1.4 改採壓入式工法的原因及其施工

在三號沉箱的災變案例發生後，原本計畫採用壓重式沉箱工法施工的五號及六號沉箱改採用壓入式工法，其最大的考量原因為沉箱下壓的難易程度。在案例一中發現，壓重式沉箱的壓入的過程受到地質影響很大。若沉箱下沉時遇到較難壓入的地層，需要靠其他輔助工法幫助下沉，例如：抽水降低上浮抵抗力、開挖擴大箱底等。但案例一的三號沉箱便在箱內抽水時因內外壓力失衡產生意外，進而造成地盤位移。壓入式沉箱因具備預先設置的反力系統，透過油壓千斤頂來幫助沉箱下沉。只要透過事先的地質調查，便可以藉由設計反力系統油壓千斤頂的支數，來克服沉箱難以下沉的問題。

五、六號兩沉箱工地配置相同，施工流程請參照圖 3-14，五號沉箱施工現場可參照圖 3-15。由圖 3-14 可以了解反力系統採用預先打入之鋼板樁，而非文獻回顧中的地錨。施工結果顯示，鋼板樁也可以穩定提供反力的幫助下沉。比較圖 3-15 及圖 3-16 可以發現，鋼板樁有承受拉力後出現上浮的跡象，因此鋼板樁可作為反力的來源，其拉力但受限於鋼板樁深度。在反力鋼板樁打設完畢後，施工單位開始構

築沉箱箱體。等到混凝土強度足夠以後，會開始進行千斤頂的組裝並進行沉箱的下沉，接著反覆進行構築箱體以後的步驟，直到沉箱沉設置預定位置。

3.2 蘆洲線 CL700A 區段標壓入式沉箱連絡通道

本節介紹台北捷運蘆洲線 CL700A 區段標以壓入式沉箱連絡通道(以下簡稱「CL700A 壓入沉箱」)。CL700A 壓入沉箱為台灣第一起壓入沉箱案例。以下介紹其：工程概述、地質概況、選擇壓入工法原因、及施工對鄰近地盤建物沉陷之影響。

3.2.1 工程概述

捷運隧道連絡通道的主要功能為供乘客緊急時(如隧道火災)避難，及維修、排水等功能。該處的 2 條捷運潛盾隧道因街道狹窄而成為上、下疊層，故無法直接構築水平的連絡通道，須配合 2 條隧道而將連絡通道立體化(如圖 3-17)。

CL700A 壓入式沉箱位於新北市三重區三和路二段與長安街的交叉口，圖 3-18 顯示該處巷弄狹小。道路(長安街)寬 9 公尺，直井邊緣距鄰房僅 2 公尺。配合現場的空間考量及潛盾隧道深度，沉箱設計為內徑 4.8 公尺、外徑 6 公尺，深度 32.9 公尺之圓型沉箱，共分 7 層施作。為保護鄰房避免沉陷，施工單位除了在沉箱周圍 1 公尺處打設鋼板樁外，並於靠建築物的兩側施作微型樁，相關配置見圖 3-19。本工程施工時間自 2008 年 7 月起，至 2009 年 2 月順利完工。

3.2.2 地質概況

工址的地層是台北典型的地層狀況，具將近 60 公尺厚的粉質黏土、粉土質砂互層。依據附近的鑽探資料(圖 3-20)，與第二次的補充鑽探資料(長安街口補充鑽探報告書，2005)，可以知道該處地層分布，地下水的變化在地表下 1 至地表下 2.5 公尺間。地層分布簡單敘述如下：

1. 第一層次：為回填雜土、混凝土塊、磚塊及木塊等物，本層之厚度約為 1.7m。

2. 第二層次：為棕黃轉灰色砂質粉土，其厚度為 3.7m，平均N值為 2.5。
3. 第三層次：為灰色粉質細至中細砂，其厚度約為 6.1m，其N值平均約為 9。
4. 第四層次：為灰色粉質粘土，其厚度約為 1.3m，N值平均約為 6。
5. 第五層次：為灰色粉質細砂，其厚度約為 3.8m，N值平均約為 11。
6. 第六層次：為灰色粉質粘土，偶夾細砂及貝層，其厚度約為 9.2m，N值平均約為 5。
7. 第七層次：為灰色砂質粉土夾粉質細砂，其厚度約為 5.8m，N值平均約為 8。
8. 第八層次：為灰色粉質細砂與砂質粉土互層，其厚度約為 6.8m，N值平均約為 13。
9. 第九層次：為灰色粉質黏土，其厚度約為 1.5m，N值平均約為 9。
10. 第十層次：為灰色砂質粉土夾粉質細砂，其厚度約為 7.0m，N值平均約為 14。
11. 第十一層次：為灰色粉質黏土偶夾砂質粉土，其厚度約為 6.4m，N值平均約為 19。
12. 第十二層次：為灰色粉質細砂偶夾砂質粉土，其厚度約為 5.4m，N值平均約為 30。
13. 第十三層次：為灰色卵礫石夾砂，本次鑽探時止於本層中，故實際厚度未知，其N值均在 100 以上。

3.2.3 選擇壓入式工法的原因

設計時施工單位曾考慮採用其他種工法構築聯絡通道，例如：冰凍工法、切削樁、及壓氣工法等。經比較各種工法之費用、交通影響、工期及可行性之後，選擇以沉箱工法施工，比較的項目及評比如表 3-3。在考慮第二章提到之各種不同的沉箱工法後，最後採用壓入沉箱工法施工，主要原因為：

1. 壓入沉箱工法在下沉時不會產生噪音，不會對周圍民眾產生干擾
2. 壓入沉箱是進行水中開挖，不會造成地下水位降低，因此降低沉箱開挖造成周圍

地盤的沉陷。

3. 壓入沉箱下沉時，可以由各點沉陷監測結果來調整千斤頂反力，因此箱體垂直精度較其他三種工法為佳。

3.2.4 施工對鄰近地盤建物沉陷之影響

工地位置旁邊兩公尺內即為鄰房，因此施工時需格外注意沉箱壓入時地盤及周遭建物造成的沉陷。CL700A 壓入式沉箱之沉陷監測區域，採取基地周邊依沉箱開挖深度 1.5 倍為監測範圍(圖 3-21，儀器編號參考表 3-5)，雖曾測得 7~10 mm 之沉陷(圖 3-22)，但並非隨著靠近沉箱，沉陷量增大之情形，顯示此沉陷量並非受沉箱施工直接影響。進一步探討工址附近區域長期地盤沉陷趨勢，發現此 7~10 mm 之沉陷為該區域長期沉陷之結果，此研究結果顯示，壓入式沉箱對周圍環境的沉陷，被限制在鋼板樁及微型樁內。

3.3 壓入與壓重沉箱工法之比較

本節將對壓入沉箱工法與壓重沉箱工法進行比較。工程進行需考慮的要素有三項要素包含：品質、工期、經費三項，本節就二種沉箱工法施工品質與工期進行比較。

1. 施工品質

壓重式沉箱下壓時較難掌握在垂直精度。在前述提到的七個沉箱中，高雄的二號沉箱有下沉時出現沉陷不均的問題(圖 3-23)，但採用壓入式工法施工的三個沉箱並沒有相似的情形。由此顯示，壓重式沉箱下壓受到下方地層特性的影響比壓入式沉箱者高。箱體垂直精度會直接影響下一層混凝土模板的組立、及與後續分支管的連結。已施工品質考量，屬於壓入式沉箱比壓重式沉箱為佳。

2. 工期

在蔡惠文(2011)統計過高雄的四個壓重式沉箱的預期完工日數與實際完工日數，如表 3-4。該統計表顯示，壓重式沉箱的實際完工日數都是預期完工日期的 1.5 倍以上。而兩個壓入式沉箱的實際完工日期與預期完工日期相差不超過一天。至於因為 CL700A 壓入式沉箱是台灣的第一個壓入式沉箱施工案例，施工單位對工期的估計非常寬鬆，因此不列入比較。表 3-4 顯示壓重式沉箱對於工期的掌握度並不如壓入式沉箱精確。高雄的六個沉箱施工案例顯示，壓入式沉箱的下沉速率是壓重式的兩倍以上，因此在工期方面，壓入沉箱明顯的占優勢。



第四章

高雄壓入沉箱施工案例

本章介紹在高雄地區使用 NF 膜及噴氣工法的壓入沉箱施工。噴氣工法使用的時機，是在沉箱下沉時，為沉箱下壓力不及下壓抵抗力，其中下壓力包含沉箱箱體自重(W)及油壓千斤頂之推力(P)，下壓抵抗力包含地下水之上浮力(U)、箱壁周面摩擦力(F)、及箱底鐵腳之刀口抵抗力(F)。本章內容包含：工程概述、沉箱介紹、地質概況、遮斷壁鋼板樁、反力系統、沉箱壓入之施工流程、及監測系統。

4.1 工程概述

本章介紹的沉箱施工案例位於高雄地區，採取壓入工法幫助沉箱下沉。沉箱工作井除了本身作為永久建築外，同時為潛盾機的發進井。因此在沉箱下沉的高程精度與垂直精度須特別注意，以方便後續工程施工。

4.2 沉箱介紹

如圖4-1所示，本次沉箱內徑為15公尺，外徑為18公尺，壁厚1.5公尺，開挖面深度40.9公尺的圓形沉箱。施工規劃鐵腳高度2.5公尺，第一節上部混凝土2.5公尺，其餘分層高度皆為6公尺，總共7層節塊。反力系統採12支反力地錨及12具油壓千斤頂，千斤頂分別以竹節形夾具棒，連結至地錨作為反力來源。將本沉箱的尺寸與表3-1的10座壓入式沉箱相互比較後發現，本沉箱的外部直徑18公尺、壁厚1.5公尺及深度40.9公尺，尺寸皆大於表3-1中提及的10座壓入式沉箱。

4.3 地質概況

依據經濟部中央地質調查所資料(五萬分之一臺灣地質圖—圖幅第六十一號—高雄圖幅第二版，2001)顯示，當地的地質為現代沖積層。現代沖積層主要由河川夾

帶之黏土、粉土、砂及卵礫石等大小不同之顆粒，以不同比例沉積而成，其厚度因地區不同而有所差異。現場鑽探後得到之鑽探資料顯示，此處的土壤以砂、泥、及礫石為主。現場BH21鑽孔柱狀圖可如圖4-2(a)所示，沉箱深度與地層的相對關係可參考圖4-2(b)，地層分布敘述如下：

第一層：回填土，厚度4.7公尺，SPT-N值分布在7-10間，平均為8。

第二層：灰色粉土質黏土夾粉土(CL)，厚度4.5公尺，SPT-N值分布在7-8間，平均為7。

第三層：灰棕色粉土質細沙夾黏土(SM)，厚度3.4公尺，SPT-N值分布在15-24間，平均為19。

第四層：棕灰色砂礫石層夾粗細砂(SP)，厚度3.15公尺，SPT-N值為20

第五層：棕黃色粉土質細砂夾灰色黏土(ML)，厚度3.25公尺，SPT-N值為46。

第六層：灰色粉土質黏土(CL)，厚度2公尺，SPT-N值為13。

第七層：風化泥岩夾砂質泥岩，厚度7.5公尺，SPT-N值分布在29-37間，平均為32。

第八層：棕黃色粗細砂夾礫石，厚度1.95公尺，SPT-N值為73。

第九層：青灰色砂礫石層夾粗細砂，厚度7.45公尺，SPT-N值分布在63-100間。

第十層：灰色粗細砂夾礫石(SP/SM)，因鑽探到此層終止，其厚度未知，SPT-N值分布在34-77間，平均值為51。

4.4 遮斷壁鋼板樁

壓設鋼板樁的目的在遮斷沉箱下壓及開挖施工造成的影響影響區域。如圖 4-1 顯示，16 m 長的鋼板樁可以限制沉箱開挖時造成的地盤位移在鋼板樁內，以達到保護鋼板樁外地盤的效果。鋼板樁除了縮限影響區域外，並在已經降挖的施工面上成為一臨時的擋土設施。如圖 4-3 顯示施工人員在降挖的地盤上施作地錨，鋼板樁便成了臨時的擋土牆。壓入沉箱作業中，壓設遮斷壁鋼板樁為壓入沉箱施工的前期作

業。

4.5 反力系統

當壓入抵抗力太大，沉箱無法靠自重下沉時，便須靠反力系統幫助壓入沉箱下沉。壓入沉箱的反力系統包含：反力地錨、竹節形鋼棒與油壓千斤頂、支壓盤與加壓桁架，如圖4.4、圖4-5所示。

4.5.1 反力地錨

反力地錨提供反力給千斤頂，幫助壓入沉箱下沉。沉箱下沉時所需要下沉力可參考本論文的式(2-1)：

$$(P + W) > (Q + F + U) \quad (2.1)$$

P：油壓千斤頂施加的壓力

W：鋼筋混凝土箱體自重

Q：箱體下方刃口處的地盤抵抗力

F：箱體與土壤間的摩擦力

U：地下水浮力

式(2-1)中的 P(油壓千斤頂施加的力)的反力來源即為反力地錨。設計單位依據式(2.1)所估算此沉箱施工所需的壓入力，結果如表 4-1。由表 4-1 結合監測油壓千斤頂的下壓數據，可以繪出沉箱下壓時深度與壓入力的關係圖，如圖 4-6。計算得到沉箱下壓時最大的壓入力為 26823.8 kN。以下分別解釋表 4-1 各欄位：

1. 箱體自重(W)的估算方式由混凝土的體積進行推估。
2. 刃口地盤抵抗力(Q)可由式(2.4)得出單位面積的承载力後，再依據式(2.3)進行估算。
3. 箱體與土壤間摩擦力(F)依據表 2-2 與表 2-3 分別估算，無 NF 膜覆蓋區間與有 NF 膜覆蓋區間的周面摩擦力值。

4. 地下水上浮力由地下水位推估。

由表4-1算出之所需壓入力，可以推估沉箱下壓需要設置的地錨數量，反力地錨設計須考慮沉箱的大小與工地現場的狀況。本案例設置四組地錨，每組三支共12支地錨，錨底打入沉箱開挖面底下20公尺，作為反力來源。因反力地錨為全摩擦型的地錨，沉箱下沉後，地錨的摩擦力因沉箱下壓，上部土層受到擾動而地錨拉力逐步損失。因此設計地錨時，沉箱預定開挖面以上的地錨均假設為自由端，如圖4-7所示。地錨設置的方式，為在預定位置將套管鑽至預定深度，將內套管拔除的同時，往孔內灌注水泥漿(一次灌漿)。接著將鋼絞線吊入孔內並拔除外套管，拉出套管後再往孔內灌漿(二次灌漿)，直到漿體自管內湧出即為完成。地錨施工流程請參考圖4-8。

4.5.2 油壓千斤頂與竹節形夾具

壓入沉箱用的千斤頂為中空的油壓千斤頂(圖4-9)，每個油壓千斤頂(JOY-300型)可施加壓力最大值為2400 kN。油壓千斤頂內部有兩個夾具，藉由兩個夾具輪流固定、向下移動箱體來幫助沉箱穩定下壓，千斤頂作用方式如圖4-10所示。

竹節形鋼棒之用途為連接油壓千斤頂與地錨，傳遞油壓千斤頂與地錨間的反力(圖4-11)。竹節形鋼棒下方連結一承壓盤，地錨鋼絞線會被夾片夾住後，將反力施在承壓盤上，承壓盤再將反力傳遞至竹節形鋼棒。竹節形鋼棒每節長37公分，可隨現場需要而調整每次組裝的節數。

4.5.3 支壓盤與加壓桁架

圖4-4顯示，支壓盤與加壓桁架的位在油壓千斤頂與沉箱壁之間。支壓盤與加壓桁架的用途為，將千斤頂的集中力(point load)透過加壓桁架變成一均佈載重，平均分配在支壓盤上。再透過支壓盤將下壓力傳遞到沉箱壁體上，以幫助沉箱下沉。

4.6 沉箱壓入施工流程

本節介紹壓入沉箱的施工流程，如圖4-12所示。本節內容包含：壓入沉箱前置作業、沉箱鐵腳、NF工法、沉箱箱體構築與壓入作業、水中開挖作業、噴氣工法、及後續作業。

4.6.1 壓入沉箱前置作業

壓入沉箱的前置作業流程已於第二章提及，本小節將以現場施工相片介紹。此工程壓設的鋼板樁為鋼板樁III型，打設的範圍為20公尺*20公尺，深度為16公尺，將沉箱包圍在鋼板樁遮斷壁內。於鋼板樁與地錨打設完畢後，施工單位開始於預定高程進行整地、換砂。

換砂的用意為，避免壓入時因地盤不均質，造成初期沉箱壁垂直精度不佳。此外，於沉箱壓入前，將會在鐵腳上構築第一層高2.5公尺之沉箱箱體，為避免因地盤承载力不足而造成鐵腳下陷。因此於整地作業完成後，進行墊木之鋪設(如圖4-13及圖4-14)，墊木主要供鐵腳(金屬刃口)組立架設(圖4-15)。沉箱刃口處為圓形線載重(line load)，若刃口直接接觸在地層上，可能因集中載重造成刃口不均勻下陷，影響沉箱施工之精度。

4.6.2 沉箱鐵腳

沉箱鐵腳內徑為15公尺，外徑為18.1公尺，於沉箱內側為一斜面，材料為鋼材，如圖4-16所示。鐵腳外徑比箱體外徑(18 m)設計多10公分的原因為，避免下壓時沉箱與土壤為緊密貼合，因而造成沉箱壁與土層介面摩擦力高於預估值。

4.6.3 NF工法

壓入沉箱施工常採用NF工法降低沉箱的周面摩擦力，其原理已於第二章述及。於本案例中，裝NF膜的鐵盒位於鐵腳上方，離鐵腳底部2.5公尺，如圖4-17所示。NF膜在第一節沉箱壓入前自盒中拉出，並掛於第一昇層沉箱上方，如圖4-18所示。當沉箱的下沉時，掛在第一昇層上的NF膜隨著沉箱下沉而被帶入土中，直到NF膜被土

層與沉箱壁夾緊，然後隨著沉箱及NF膜鐵盒的下沉，NF膜逐漸被從NF鐵盒內拉出。多餘之NF膜便放於沉箱旁，如圖4-19。

4.6.4 沉箱箱體構築與壓入作業

當裝NF膜的鐵盒安裝完畢後，開始第一節沉箱的構築。第一昇層沉箱包含鐵腳，因此第一昇層沉箱分兩階段構築：鐵腳混凝土澆置、及第一節箱體綁紮鋼筋及澆置混凝土。當鐵腳的混凝土澆置完成後，才再次進行第一節沉箱的組模。沉箱第一節軀體完成後，即進行沉箱壓入之作業。作業前需架設加壓桁架與下壓千斤頂，待沉箱壓入預定深度後，便拆除加壓桁架與下壓千斤頂。接著進行下一階段沉箱軀體製作(如圖4-20所示)與沉箱壓入作業。此後的每一節沉箱均為一次澆置完成。

4.6.5 水中開挖作業

壓入沉箱之開挖作業屬於水中開挖，如圖4-21所示，以降低沉箱施工對鄰近地盤造成之影響。開挖時須注意沉箱內的水位面須保持在地下水位以上大約一公尺，避免地下水流向沉箱內部造成砂湧。水中開挖時須隨時注意監測開挖面的深度，開挖面不得低於鐵腳底部，以避免砂湧。壓入沉箱係反覆進行沉箱箱體構築、壓入及開挖三個步驟，直到沉箱下沉至預定深度。

4.6.6 噴氣工法

噴氣工法的使用時機為，沉箱下沉時下壓力量不足以克服下壓阻力。其作用的原理已經於第二章提過，本小節介紹噴氣工法於現場的使用。噴氣管的配置位置在沉箱的高程較低的昇層壁體內，以有效降低沉箱周面摩擦力。於澆置箱壁混凝土時，便以保麗龍塊預先留下氣體噴射管道以便後續噴氣工法的進行(如圖4-22(a)、圖4-22(b))。各層的噴氣管直接連結到最上方的箱體。沉箱下沉時，便依需要而將壓力為7-10 kgf/cm²支高壓空氣經噴氣管傳送到指定昇層的噴氣孔噴氣(如圖4-23)，降低

沉箱之周面摩擦力，幫助沉箱下沉。

4.6.7 後續作業

當沉箱下沉及開挖至預定位置後，開始進行壓入沉箱的後續作業：鐵腳清洗及水中攝影、打設水中混凝土與沉箱底板、及背填灌漿。

當沉箱下沉完畢後，開始以高壓水柱清洗鐵腳如(圖 4-24)。清洗完畢之後，投入沉澱劑並靜置之，沉澱水中雜質。靜置沉澱過後，以水中攝影確認鐵腳處是否還有淤泥如(圖 4-25)。若淤泥未清除乾淨，可能因淤泥形成水路，造成沉箱底部漏水。

確認鐵腳處的淤泥已清理完畢後，開始澆置水中混凝土，其過程可參照圖 4-26。於水中混凝土養護至預定強度期間，可藉由噴氣工法之 PVC 管實行箱壁外側之背填灌漿，以填充沉箱壁與土壤間的縫隙。當水中混凝土強度達到預計強度後，開始打設沉箱底板。

打設底板前，進行沉箱內部降水作業與清理沉箱壁。降水至底板後，先打除底板上的劣質混凝土，再進行底板鋼機綁紮及混凝土澆置作業，如圖 4-27 所示。

4.7 監測系統

為確保工程順利的進行，於沉箱周圍 2 倍開挖深度(81.8 公尺)為監測範圍，如圖 4-28 所示。施工單位於監測範圍內設置土中傾度管 2 支、水位監測井 1 個、及 3 處沉陷觀測點進行監測，監測儀器數量與監測頻率如表 4-2。沉陷結果因整體工程仍在進行中，因此缺乏完整監測資料進行研究。

第五章

以直剪試驗探討 NF 工法及噴氣工法

本章介紹以直剪試驗模擬壓入沉箱採用 NF 工法及噴氣工法造成之界面摩擦角。於第四章的案例中，曾採取 NF 工法及噴氣工法降低箱體與地層之摩擦力幫助沉箱下沉，但過去並沒有相關的試驗模擬同時採用 NF 工法及噴氣工法之疊加效果，因此本章擬藉由室內噴流直剪試驗來探討噴氣壓力大小對降低界面摩擦角之效益相關的機制。

5.1 試驗材料

本節介紹室內噴流直剪試驗使用的相關材料，包含：試驗土壤、混凝土試體、及 NF 膜。

5.1.1 試驗土壤

本研究的所有直剪試驗所採用的土壤皆為渥太華標準砂(Ottawa sand)，其性質見表 5-1，本試驗採取渥太華標準砂的原因包含：

- (1) 渥太華砂為圓形顆粒，避免試驗過程中的稜角效應。
- (2) 渥太華砂粒徑分布均勻 ($C_u=1.52$)，避免因土壤級配的影響。
- (3) 渥太華砂顆為高剛性，不會因試驗過程承受高壓力而破碎

基由上述原因，及方便試驗結果與其他類似實驗結果比較，因此採用渥太華砂為試驗用砂。

5.1.2 混凝土試體

本試驗的混凝土採取試驗室自拌混凝土製作試體，取代直剪試驗之下盒，模擬

沉箱壁體的材料。於自製壓克力模具(長寬各 80 mm、高 20 mm)，如圖 5-1(a)中，鋪設鋼模片模擬現場使用的鋼模，並於模具內與鋼模上抹上礦物油(機油)以利拆膜時，試體與模具分離。再將水泥、砂、與水依 1:2.75:0.6 之配比拌合(如圖 5-1(d))，將拌合過後的混凝土倒入模具內(如圖 5-1(e))，待隔天初凝後放入水中養護 7 天，混凝土試體之製作過程請參照圖 5-1。

為模擬沉箱壁上同時採用 NF 工法及噴氣工法，研究製作附外徑 3 mm 噴氣管及噴氣口之混凝土下。如圖 5-2 所示，噴氣管的開口至於混凝土面的中心處。由於噴氣管突出於混凝土試體之外，無法用圖 5-1(a)的模具。噴氣直剪試驗使用的混凝土模具於側邊上鑽有一小孔(如圖 5-3)，用以通過及固定噴流銅管。該孔的直徑為 3 mm，位於距左右邊各 40 mm，距模具頂部 4.5 mm。製作噴氣混凝土試體前，須先將噴氣管藉由該孔固定後，於鋼模片與噴流孔間放入事先切好的錐狀橡皮墊塊。橡皮墊塊的用途為，避免流態混凝土自噴氣孔內流入銅管造成阻塞。當整個模具準備完成後，再將混凝土灌入試體膜。製作過程可參照圖 5-4(a)至(e)。

5.1.3 NF 膜

本試驗使用的 NF 膜來自高雄壓入式沉箱現地施工所裁下的 NF 膜，NF 膜為厚度 0.17mm 的薄鋼片。於現場運回實驗室後，裁成長 116 mm，寬 80 mm 的長方形，為方便於施加剪力前以 2 支螺柱將上下盒頂開，其位置如圖 5-5(a)所示。將鑽孔後的 NF 膜彎折，並包覆於直剪盒上盒支底部(如圖 5-5(b))，最後藉著強力雙面膠將直剪上盒與 NF 膜固定在一起。

5.2 直剪試驗儀及空氣噴流系統

為模擬沉箱壁與土壤間的介面摩擦行為，本試驗使用以下設備進行試驗：直剪試驗儀及空氣噴流系統。

5.2.1 直剪試驗儀

本試驗藉由國立交通大學土力實驗室之直剪試驗儀，模擬沉箱壁體下沉時與土壤間的相對運動。將下盒置換為混凝土試體來模擬沉箱壁體，並於上盒置入渥太華砂模擬沉箱周遭土壤。透過直剪試驗以模擬混凝土箱體與土壤間剪力與剪位移的關係。

本實驗採用的直剪儀上盒放置砂的位置為圓形，直徑為 63 mm、高 15.3 mm，載重環最大到 1980 N，讀取剪位移與垂直位移方向的指針最小單位均為 0.01 mm。

5.2.2 空氣噴流系統

空氣噴流系統用以模擬使用噴氣工法時的沉箱。空氣自壓縮機打出來後，先經由第一個調壓閥降壓。經由管線輸送後，會在距直剪盒 1.5 公尺處進行第二次降壓。藉由第二次降壓後可以獲得所需的壓力，並由第二個調壓閥讀出的壓力值視為噴氣孔的壓力值，如圖 5-6 所示。

5.3 噴氣直剪試驗方法與流程

本節介紹下列四種直接剪力試驗之實驗方法與相關步驟

- (1) 透過一般直剪試驗得出相對密度 55% 的渥太華砂的摩擦角($\phi=32.8^\circ$)。
- (2) 將下盒換成混凝土試體，再次進行直剪試驗求出砂與平滑混凝土的界面摩擦角。
- (3) 將直剪上盒底部包覆 NF 膜後，進行直剪試驗得到平滑混凝土與 NF 膜界面之摩擦角。
- (4) 在平滑混凝土內埋設噴氣管，由噴氣孔噴出加壓空氣。調整氣壓的大小(σ_a)保持正應力(σ_n)有一定比值關係，定義此比值為氣壓比(air pressure ratio, APR):

$$APR = \sigma_a / \sigma_n \quad \text{式 5.1}$$

以實驗求得在不同分氣壓力狀態下的界面摩擦角 δ 。

(a) 一般直剪試驗的試驗步驟(如圖 5-7)為：(1) 於直剪上下盒內備製 55%相對密度的渥太華砂。(2) 蓋上透水石與上蓋板，並加載正向荷重。(3)安裝直剪盒上方的垂直測微計。(4)以微調螺柱將上盒微微頂起，避免上下盒接觸，摩擦力可能影響實驗數據。(5)調整各個位移計讀數後，開始施加剪位移。

(b) 混凝土與砂土界面之直剪試驗係將步驟(1)調整為：直剪下盒以混凝土試體取代後，於上盒內備製中等緊密之砂土。並重複步驟(2)到(5)。在現地的 NF 膜在被夾在土層與沉箱箱壁之間，滑動面發生在箱體與 NF 膜之間。因此 NF 膜直剪試驗在試驗前將上盒底部包覆 NF 膜，並以雙面膠將 NF 膜固定在上盒外側，使滑動面發生在混凝土試體與 NF 膜之間，模擬現場狀況。然後重複直剪試驗。

(c) 而噴氣直剪試驗的步驟為：(1)以預先埋設噴氣管的混凝土試體取代直剪下盒，並接上噴氣管(如圖 5-8(a))。(2) 蓋上透水石與上蓋板，並加載正向力。(3)安裝直剪盒上方的測微計，並調整噴流空氣之壓力(圖 5-8(e))。(4)以微調螺柱將上盒微微頂起，避免上下盒接觸。(5)調整各個位移計讀數後，開始進行試驗。試驗相片如可參考圖 5-8。

5.4 試驗結果

本節說明一般直剪試驗與噴流直剪的試驗成果。其中包含：中等緊密渥太華砂之內摩擦角、渥太華砂與平滑混凝土介面摩擦角、NF 膜與混凝土介面摩擦角、不同噴氣壓力下之 NF 膜與混凝土介面摩擦角。

5.4.1 中等緊密渥太華砂之內摩擦角

本研究進行的渥太華砂直剪試驗，採用之正向應力為 90、120、150、及 180 kN/m²。實驗獲得中等緊密渥太華砂剪應力與剪位移及與體積應變與剪位移的關係如圖 5-9 所示，正向應力與剪應力形成破壞包絡線如圖 5-10 所示。在相對密度為 55%狀

態下，渥太華砂的內摩擦角中尖峰值(peak value)為 32.9 度、殘餘值(residual value)為 32.1 度。

5.4.2 渥太華砂與混凝土之介面摩擦角

以平滑混凝土試體取代直剪下盒進行直剪試驗，施加的正應力為 90、120、150、及 180 kN/m²。得出混凝土與渥太華砂界面的剪應力與剪應變的包絡線，如圖 5-11。依據圖 5-11 可以建構正應力與剪應力的破壞包絡線，如圖 5-12，圖中可得出混凝土與砂的界面摩擦角為 $\delta_{cs}=22.3$ 度

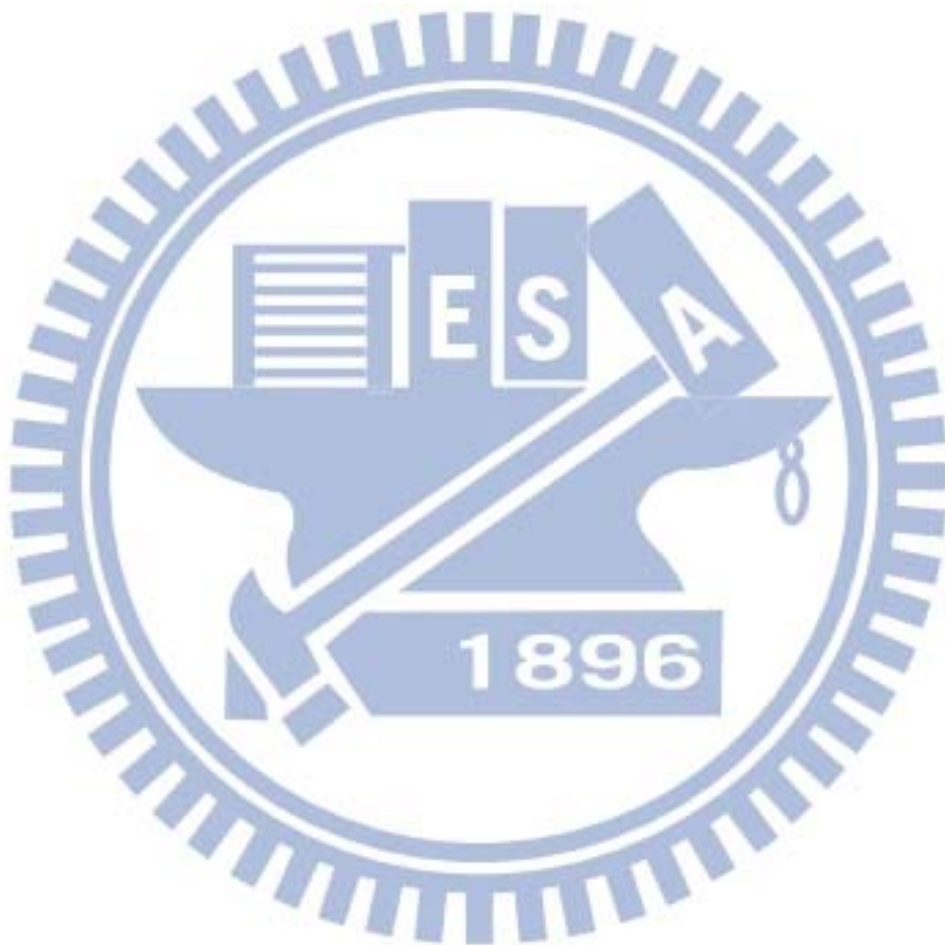
5.4.3 NF 膜與混凝土介面摩擦角

將 NF 膜包覆於上盒底部進行直剪試驗，本研究採取的正應力分別為 90、120、150、及 180 kN/m²。可以得出混凝土材料與 NF 膜界面的剪應力與剪應變的破壞包絡線，如圖 5-14。可求得混凝土與 NF 膜的界面摩擦角為 $\delta_{cns}=16.7$ 度。

5.4.4 不同噴氣壓力下之 NF 膜與混凝土介面摩擦角

本試驗以噴流直剪試模擬沉箱下沉時混凝土箱壁、氣壓、NF 膜、及土壤之界面摩擦行為。因空壓機壓力受限制，無法達到現場之空氣壓力 700~1000 kN/m²，改採以實驗室能模擬的壓力比範圍為主，本研究採取的正向力分別為 30 kN/m²、45 kN/m²、及 60 kN/m²。在 30 kN/m² 下採取的空氣壓力為 30、60、90、120 及 150kN/m²(APR 為 1、2、3、4、5)，其剪應力與剪位移的關係圖如圖 5-15 所示。在正向力 $\sigma_n=45$ kN/m² 下採取的空氣壓力為 45、90、150 kN/m² (APR 為 1、2、3)。其剪應力與剪位移的關係圖如圖 5-16。在 $\sigma_n=60$ kN/m² 下採取的空氣壓力為 60、120 kN/m²(APR 為 1、2)。其剪應力與剪位移的關係圖如圖 5-17。整理正向力與剪應力的關係圖，可繪出圖 5-18。圖中顯示，隨著噴氣壓力的增大(APR 值加大)，界面摩擦角逐漸自 $\delta=13^\circ$ (APR=1)，減小到 $\delta=9.6^\circ$ (APR=2)及 $\delta=8.8^\circ$ (APR=3)。整理上述各種不同正應力與不同 APR 得的資料，可繪出 APR 與界面摩擦角的關係圖，如圖 5-19。以此可以看出 NF 膜及噴氣工法的降低摩擦力的效果。圖中界面摩擦角 δ 值隨著氣

壓的增大(APR 從 0 增大到 5)，界面摩擦角 δ 逐漸減小。當 APR=3.0 (σ_a 為 σ_n 的三倍)， δ 角即不再隨著 APR 之增大而下降。這可能是由於噴氣孔周圍之高壓空氣延徑間快速下降，氣體快速逸散，(如圖 5-20 所示)，因此界面摩擦角為值 $\delta=8.8$ 度不再改變



第六章

結論與建議

本論文探討高雄地區壓入沉箱的施工案例，記錄壓入沉箱施工過程，並進行直剪試驗與噴氣直剪試驗，探討氣壓的大小對降低沉箱周面摩擦力之影響，獲得以下結論與建議。

6.1 結論

1. 壓入沉箱之案例顯示，採用壓入沉箱施工可有效控制工期及降低沉箱下沉對周遭地盤之影響。因此於較狹窄處施工，可考慮採用壓入沉箱施工，以降低對周遭地盤及鄰近建物之影響。
2. 施工現場案例顯示，噴氣工法可有效降低箱體的周面摩擦力。但是於地盤中灌注大量壓縮空氣，可能對周圍地盤造成擾動，須謹慎使用。
3. 高雄案例的壓入式沉箱外徑達 18 公尺，顯示壓入工法可應用於大斷面的直井施工，並作為潛盾隧道的發進井。
4. 由直剪試驗結果顯示，使用 NF 膜可以降低混凝土試體與渥太華砂之間的摩擦力。實驗測得混凝土試體與中等緊密砂的介面摩擦角為 22° ，以平滑鋼片製成之 NF 膜包覆於直剪試驗上盒底部後，獲得的混凝土試體與 NF 膜界面摩擦角成為 16.7° ，摩擦角下降了 5.3° 。
5. 噴氣直剪試驗結果顯示，隨著噴氣壓力的增大(壓力比 APR 自 0 增大到 3)，混凝土試體與 NF 膜間的界面摩擦角逐漸減小。界面摩擦角自 16.7° (當 APR=0)減小到 $\delta=13.0^\circ$ (當 APR=1)，及 $\delta=9.6^\circ$ (當 APR=2)，最後到 $\delta=8.8^\circ$ (當 APR=3)。噴氣直剪試驗結果顯示當壓力比 APR 大於 3.0(氣壓 σ_a 為正應力 σ_n 的三倍)，界面摩擦角下限值保持 8.8° ，不再隨著壓力比 APR 之增大而下降。

6.2 建議

1. 因實驗室空壓機無法提供與現場同樣的最大空氣壓力 σ_a (10 kgf/cm² 即 981 kN/m²) 及供氣量，因此僅能藉由降低直剪試驗正向應力 σ_n 以提高 APR，若能增大空壓機之壓力及供氣量，或許可將試驗室的實驗資料，與現地作用於沉箱周面之氣壓及摩擦力進行比較。
2. 因壓入沉箱並未安裝荷重計於沉箱底部，無法實際得知刃口處的承載力。如果有機會安裝荷重計以獲得刃口承載力，可將沉箱自重與油壓千斤頂的壓力總和扣除刃口承載力後。所得的值即為摩擦力與上浮力的和，可更精確推得沉箱壁與土壤間的介面摩擦力。



參考文獻

1. 台北市政府捷運工程局 (2008), “壓入沉箱工法設計與施工”, 捷運工程叢書 23。
2. 中央地調所 (2001), “高雄[臺灣地質圖幅及說明書1/50,000]”, 五萬分之一臺灣地質圖及說明書 61。
3. 李昌國、李魁士、林摩西、金丸清人 (2005), “沉箱工法在都市捷運之應用—以蘆洲線CL700A 為例” 捷運技術半年刊, 第33 期, 第127-138 頁。
4. 徐鵬飛、李耀良、徐 偉 (2014), “壓入式沉井施工對環境影響的現場監測研究”, 岩土力學, 第35卷第4期, 第1084-1094頁。
5. 張崇義 (1989), “牆面粗糙度及其移動型式對土壓力之影響”碩士論文, 國立交通大學土木工程系, 新竹, 台灣。
6. 陳聯獻、李昌國、賴旭明、邱志榮 (2009), “以壓入沉箱工法施築連絡通道新技術—以蘆洲線CL700A 為例”, 捷運技術半年刊, 第41期, 第107-118 頁。
7. 賴旭明、李昌國、游澄發 (2008), “台北捷運系統蘆洲線CL700A標連絡通道場鑄壓入沉箱工法介紹”, 捷運技術半年刊, 第37期, 第87-98 頁。
8. 蔡惠文 (2011), “壓重與壓入沉箱工法應用於都會區之研究-以高雄市楠梓區為例”碩士論文, 國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所。
9. 日本道路公團(1970) ”設計要領第二集”。
10. 阪神高速道路公團(1990), “圧入オープンケーソンの設計指針”。
11. 角田安一、泉満明(1981), 圧入ケーソン工法の設計と施工, オーム社。
12. Hu, L. and Pu, J., (2004) “Testing and modeling of soil-structure interface” J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 130(8), 851-860.
13. Potyondy, J. G., (1961) “Skin friction between various soils and construction materials,” Geotechnique, 11(4), 339-353

表 2-1 周面摩擦力表
(摘自角田安一與泉滿明，1981)

土質 \ 沉箱深度(m)	8	16	25	30	40
細砂	2	4	5	6	7
壓實的細砂	5	6	7	9	10
壓實的砂	12	14	17	20	22
混合礫石的砂	14	17	20	22	24
混合砂的礫石	17	20	22	24	26
壓實的砂礫	22	24	27	29	31

單位：(kN/m²)

表 2-2 未使用下沉促進工法之周面摩擦力表
(摘自阪神高速道路公團，1990)

土 質	出 典			實 測 值		推 薦 值 (kN/m ²)
	壓入工法之 設計與施工	土木工學 手冊	道路橋示方書	魚崎浜工區	助松工區	
粘土	——	50.0~200.0	5.0~10.0	32.0	19.0~25.0	30
細砂	2.0~ 7.0	——		——	——	
壓實的細砂	5.0~ 10.0	——		——	——	
壓實的砂	12.0~22.0	35.0~ 70.0	14.0~24.0	15.0~ 25.0	20.0~36.0	30
混合礫石的砂	14.0~24.0	——	22.0~31.0	——	24.0~30.0	
混合砂的礫石	17.0~26.0	——		——	24.0~44.0	100
壓實的砂礫	22.0~31.0	50.0~100.0		80.0~130.0	——	

表 2-3 有使用下沉促進工法之周面摩擦力表
(after 阪神高速道路公團，1990)

深度(m)	NF 工法 型錄	其 他 機 關 之 實 測 值			實 測 值		推薦值 (kN/m ²)
		浜寺外環 道	新富 士川	紀州 大橋	魚崎浜 工區	助松工區	
0~ 5	2.0	25.0~39.0 (平均值)	15.0 (平均值)	17.0 (平均值)	6.0	7.0	5.0
5~10	6.0				6.0	8.0	10.0
10~15	10.0				10.0~20.0	14.0	15.0
15~	12.0				10.0~20.0	14.0~17.0	20.0
備 註		NF 膜	NF 膜	NF 膜	NF 膜	NF 膜	
		噴氣	噴氣	噴氣	噴氣	噴氣	

表 3-1 台灣壓入式沉箱統計

沉箱位置	沉箱用途	沉箱形狀	沉箱外部尺寸(m)	沉箱壁厚(m)	沉箱深度(m)	完工日期
台北 (CL700A)	捷運聯絡通道	圓形	6	0.6	32.4	2007.1
高雄五號	汗水工作井	矩形	7.8 x 6	0.8	18.4	2008
高雄六號	汗水工作井	矩形	5.6 x 5.6	0.6	21	2008
台南	電纜分歧井	圓形	6.3	0.6	20.3	2009
台北	聯絡通道	圓形	3.83	0.4	3.83	2012.2
高雄	汗水工作井	圓形	12.4	--	24.6	2014
高雄	汗水工作井	矩形	11x7.5	--	25.6	2014
高雄	汗水工作井	矩形	11x7.5	--	26.4	2014
高雄	汗水工作井	矩形	6.2x4.7	--	26.3	2014
高雄	汗水工作井	圓形	12.4	--	26.3	2014



表 3-2 高雄楠梓汗水主幹管沉箱資料

沉箱編號	沉箱內部尺寸 (m)	壁厚 (m)	沉箱深度 (m)	施作工法
一	6.2 x 4.4	0.8	21.03	壓重沉箱
二	4.4 x 4.4	0.6	22.75	壓重沉箱
三	6.2 x 4.4	0.8	23.65	壓重沉箱
四	4.4 x 4.4	0.6	24.5	壓重沉箱
五	6.2 x 4.4	0.8	18.4	壓入沉箱
六	4.4 x 4.4	0.6	21	壓入沉箱

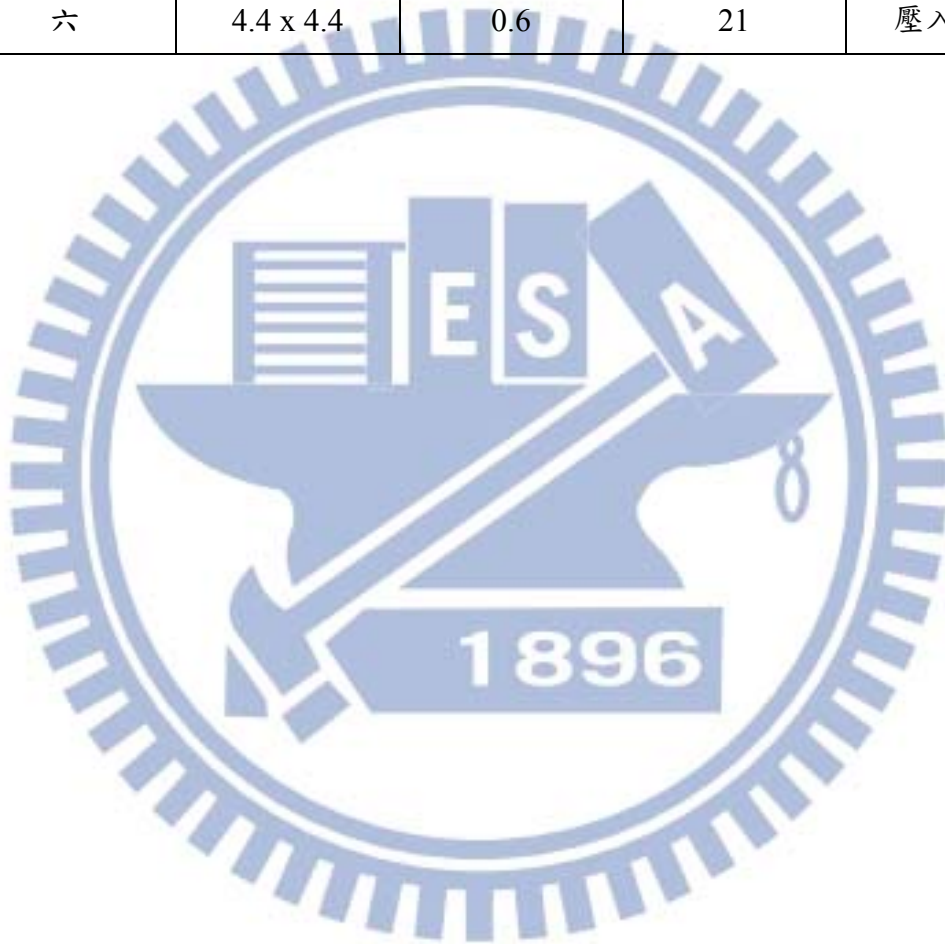


表 3-3 聯絡通道施工比較
 (摘在台北市政府捷運工程局，2008)

工法	設置豎井		地中直接鑽挖	
輔助工法	切削樁	沉箱	大口徑灌漿+壓氣	冰凍工法
費用	低	中	高	極高
交通影響	切削樁須進行日夜 24 小時施工	用地小，可配合離峰時段施工，減少衝擊	大範圍地盤改良 車道管制 5 個月	道路全區封閉 18 個月
影響通車 要徑工期	3 個月	3 個月	8 個月	15 個月
可行性	佳	優	可	普通

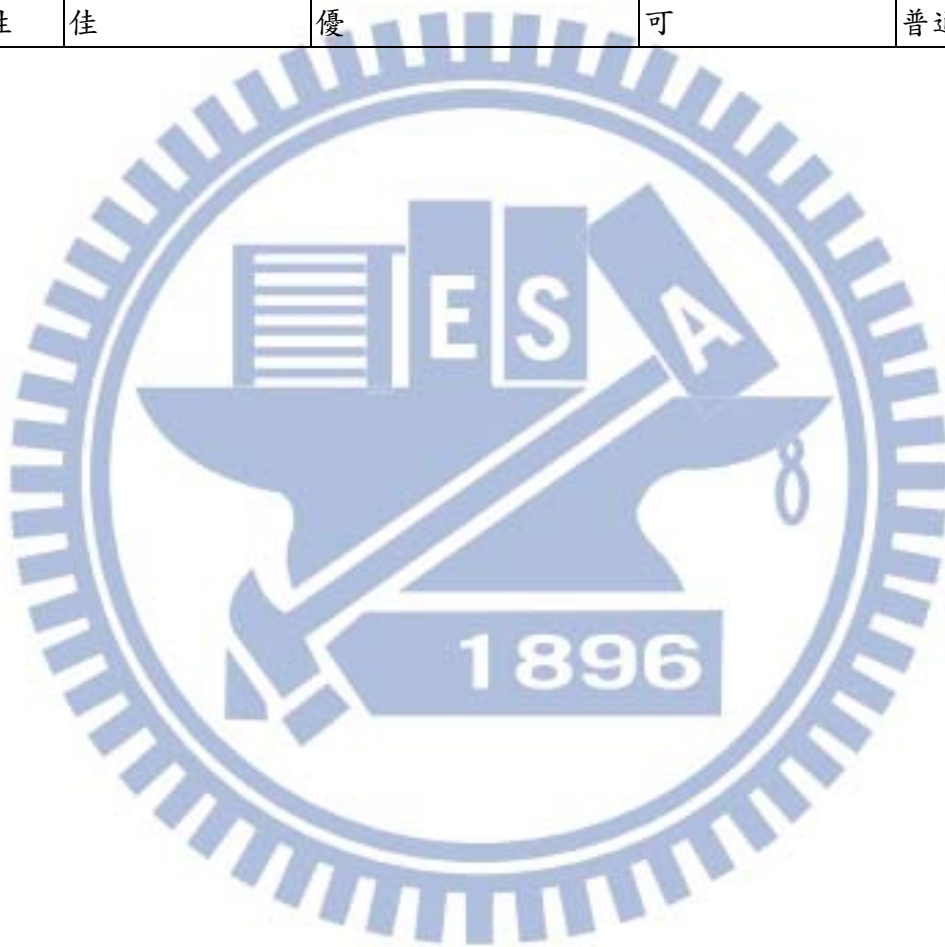


表 3-4 高雄楠梓汙水主幹管沉箱施工時間比較

沉箱編號	沉箱層數	沉箱深度	預估日數	工作日數	平均沉降一層的所花的時間(天)	平均沉降速率(m/day)
一	6	21.03	60	101	16.83	0.21
二	7	22.75	60	147	21.00	0.15
三	7	23.65	60	106	15.14	0.22
四	7	24.5	60	168	24.00	0.15
五	5	18.4	60→38	38	7.6	0.48
六	6	21	45	46	7.67	0.46

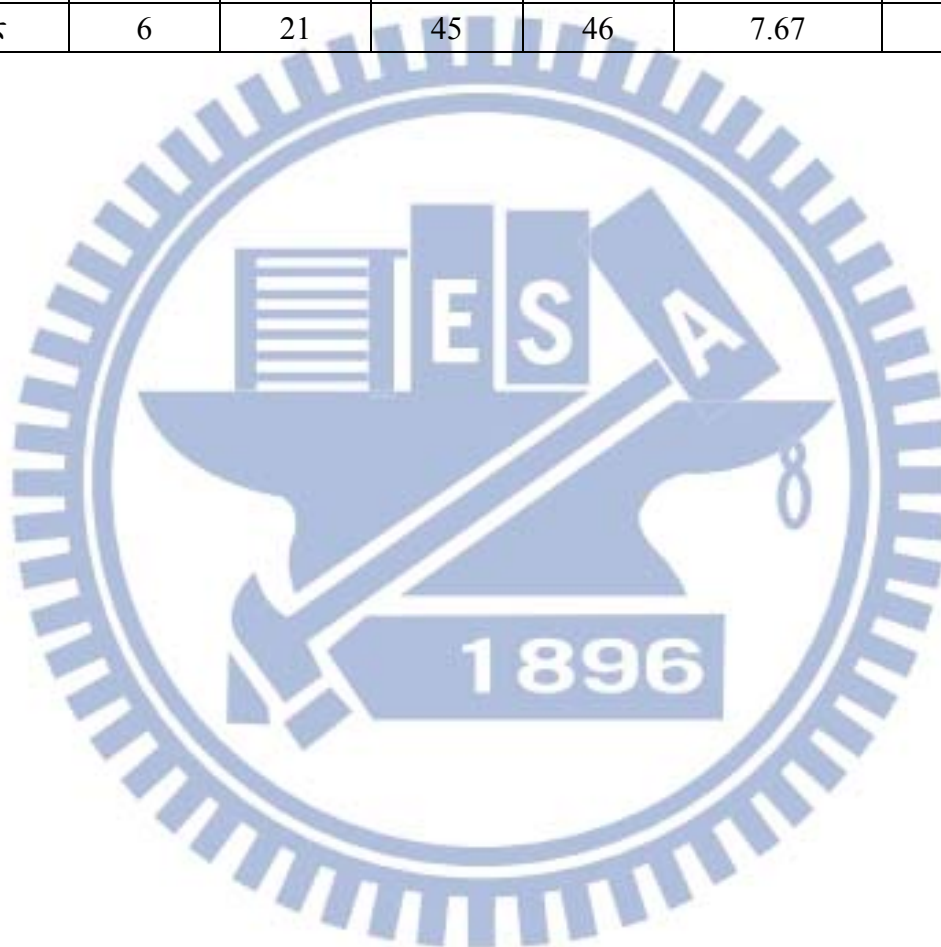


表 3-5 CL700A 壓入沉箱監測儀器配置
(摘自台北捷運工程局，2008)

施工項目	沉箱壓入、開挖施工	沉箱構築施工
監測範圍	0~1.5D(沉箱開挖深度)	0~1.5D(沉箱開挖深度)
建物沉陷點	NB-084,NB-090,NB-091,NR-092, NB-093,NR-096,NR-097,NR-098, NR-099,NB-100,NB-101,NB-102, NR-103,NR-105,NR-106,SB-061, SR-065,SR-066,SR-068,SR-069, SR-070,SR-071,SR-072,SR-074, SR-075,SR-076,SR-077,SR-078, SR-086,	NB-084,NB-090,NB-091,NR-092, NB-093,NR-096,NR-097,NR-098, NR-099,NB-100,NB-101,NB-102, NR-103,NR-105,NR-106,SB-061, SR-065,SR-066,SR-068,SR-069, SR-070,SR-071,SR-072,SR-074, SR-075,SR-076,SR-077,SR-078, SR-086,
頻率	每週二次	每週一次
淺式沉陷點	SSI0090~94,SSI0095~98	SSI0093~98
頻率	每週二次	每週一次
建物傾斜計	NR-097,NR-106,SR-068,SR-075, SR-086	NR-097,NR-106,SR-068,SR-075, SR-086
頻率	每週二次	每週一次
土中傾度管	SIS0016,SIS0015	SIS0015,SIS0016
頻率	每週二次	每週一次
多桿式伸縮儀	EXM0007~8,EXM0009~10	EXM0007~8,EXM0009~10
頻率	每週二次(僅量測外管高程。)	每週一次(僅量測外管高程。)
豎管式水壓計	PZS0034~35,PZS0037~38	PZS0034~35,PZS0037~38
頻率	每週二次	每週一次

表 4-1 沉箱下沉所需的壓入力

節	刃口深度 (m)	自重 W (kN)	浮力 U (kN)	周面摩擦力 F (kN)	刃口抵抗力 Q (kN)	下沉 抵抗力 總和 (kN)	所需 壓入力 (kN)
1	4.50	7,531.3	-	4,830.0	19,313.0	24,143.0	16,611.7
2	10.50	18,960.6	3,595.4	7,374.8	25,969.5	36,939.7	17,979.1
3	16.50	30,389.9	8,260.7	13,013.3	34,389.4	55,663.4	25,273.5
4	22.50	41,819.2	12,925.9	18,402.0	36,296.8	67,624.7	25,805.5
5	28.50	53,248.5	17,591.2	25,188.0	36,296.8	79,076.0	25,827.5
6	34.10	63,915.8	21,945.4	41,472.1	26,774.0	90,191.5	26,275.7
7	40.85	75,822.8	27,193.9	39,155.9	36,296.8	102,646.6	26,823.8



表 4-2 壓入沉箱施工周邊監測頻率

編號	項目	儀器數量	觀測頻率	警戒值	行動值
1	傾度管	2	每周一次，開挖期間 兩次	50 mm	65 mm 或曲 率超過 1:350
2	水位觀測井	1	開挖期間每周兩次， 建造期間每周一次	+1.0 m	+2.0 m
3	沉陷觀測點	3	開挖期間每周兩次， 其餘一次	20 mm	25 mm

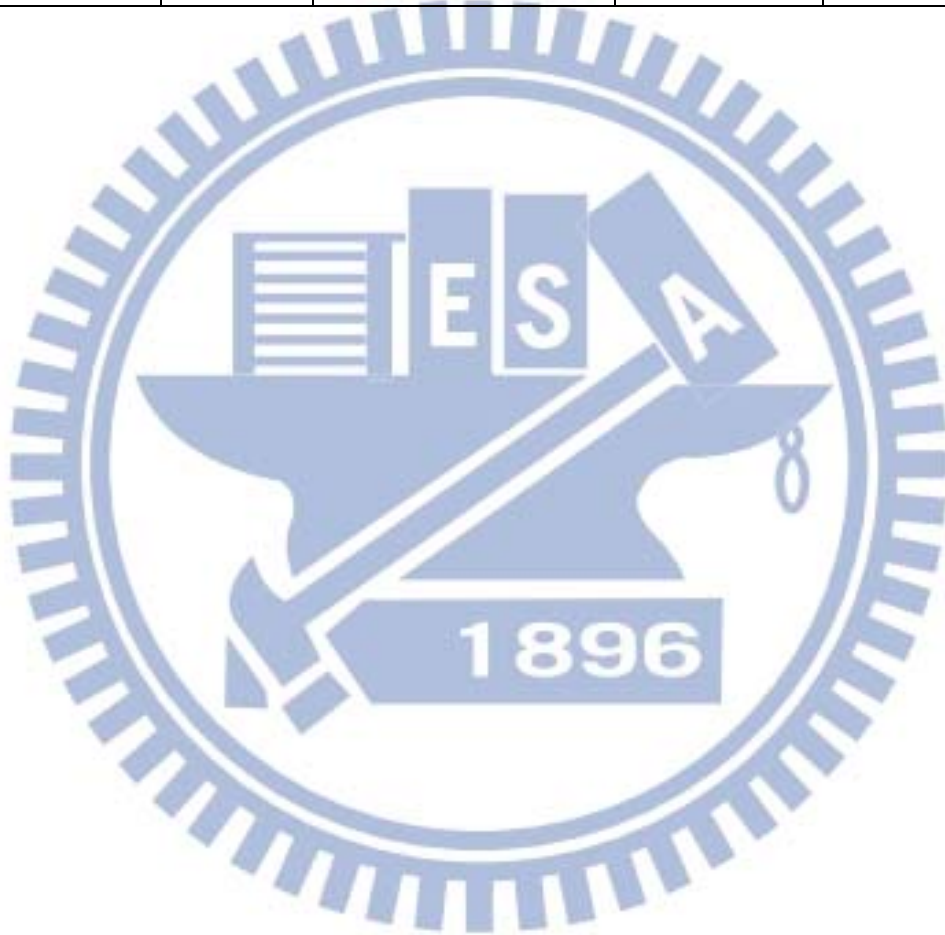
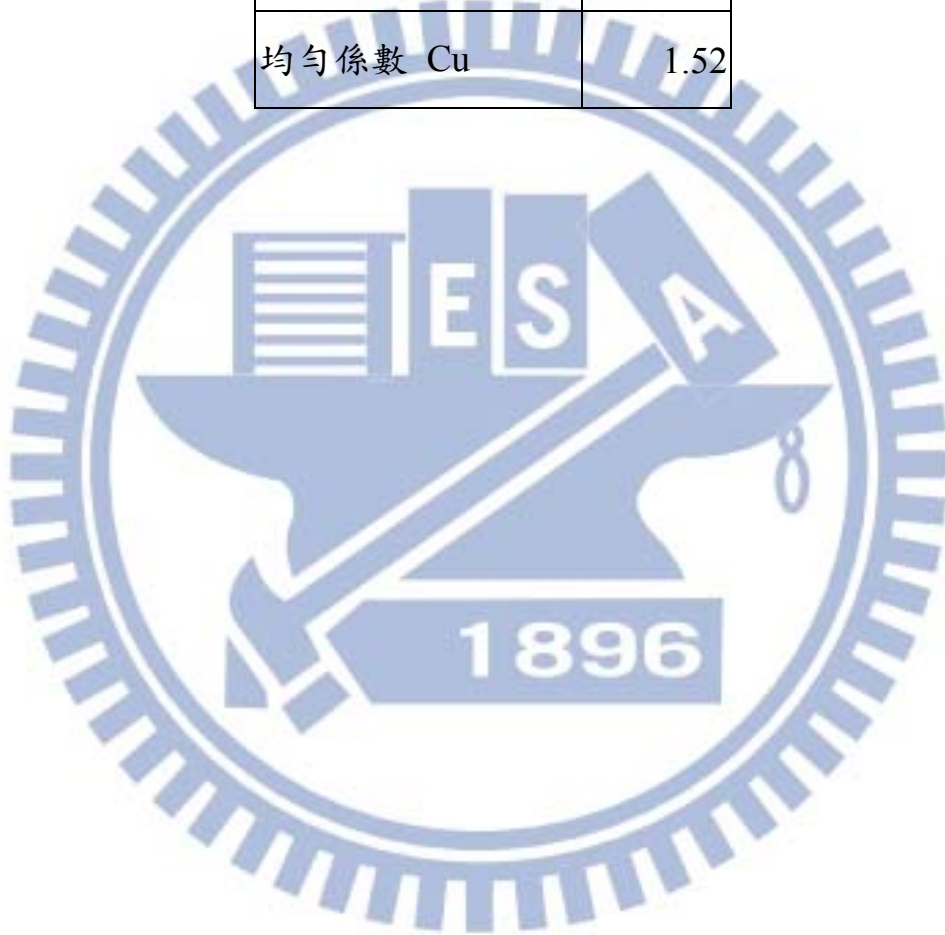


表 5-1 渥太華砂性質

比重 G_s	2.65
最大孔隙比 max	0.76
最小孔隙比 e_{min}	0.5
有效粒徑 D_{10}	0.21
均勻係數 C_u	1.52





(a) 壓重式沉箱上的加重塊



(b) 壓重式沉箱開挖導致鄰近之地層掏空

圖 2-1 壓重沉箱工法

(左圖摘自台北市政府捷運工程局，2008；右圖摘自蔡惠文，2011)

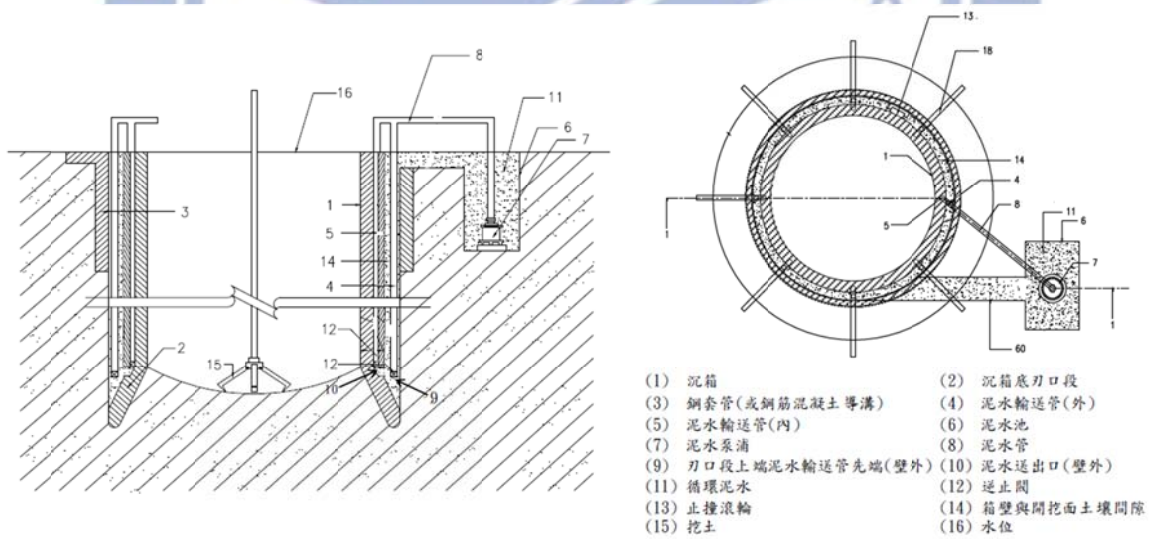


圖 2-2 穩定液改良沉箱工法示意圖



(a) 注泥設備 (b) 注入管與注入位置 (c) 開挖沉設

圖 2-3 穩定液改良壓重沉箱工法施工圖

(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)

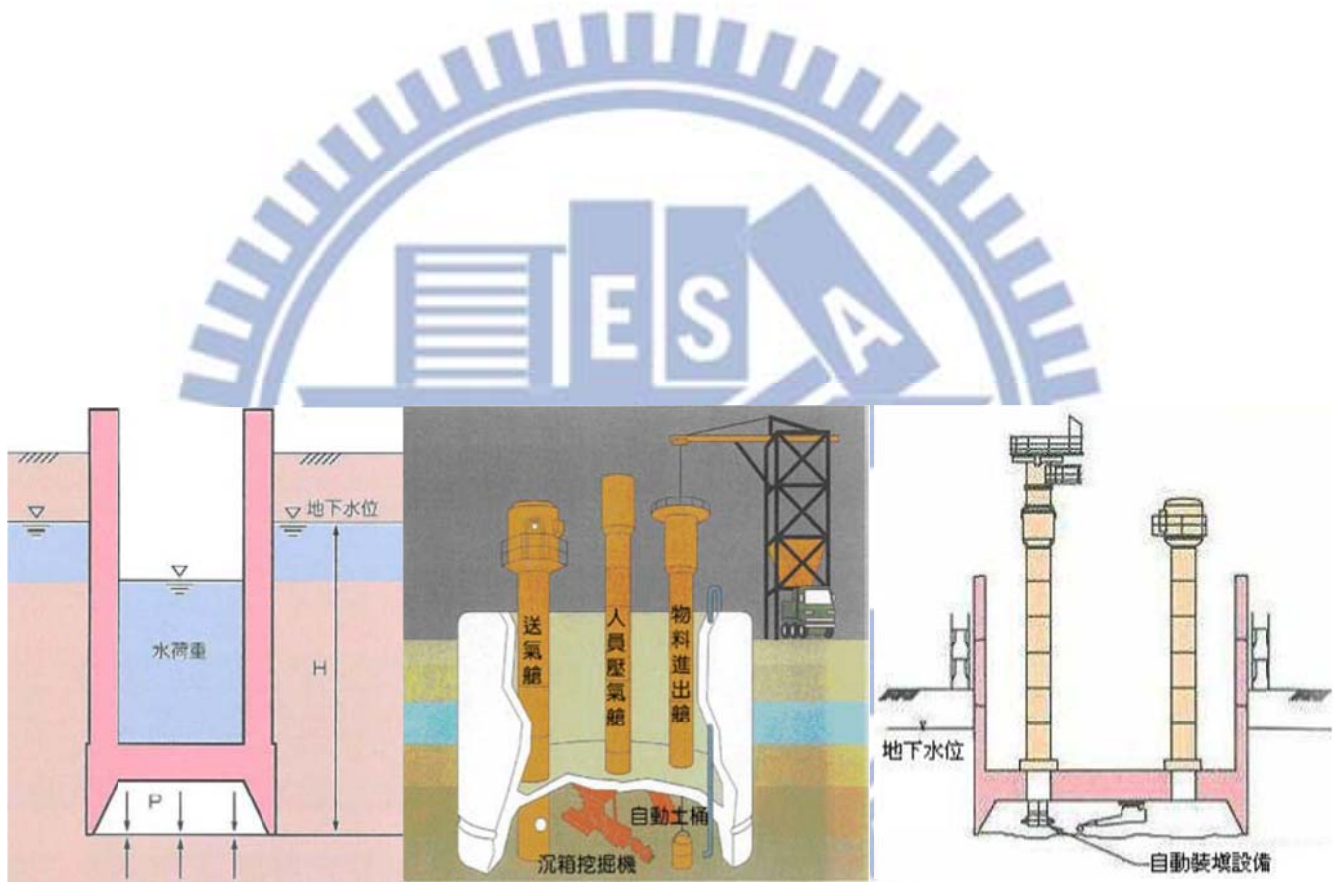


圖 2-4 壓氣沉箱工法示意圖

(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)

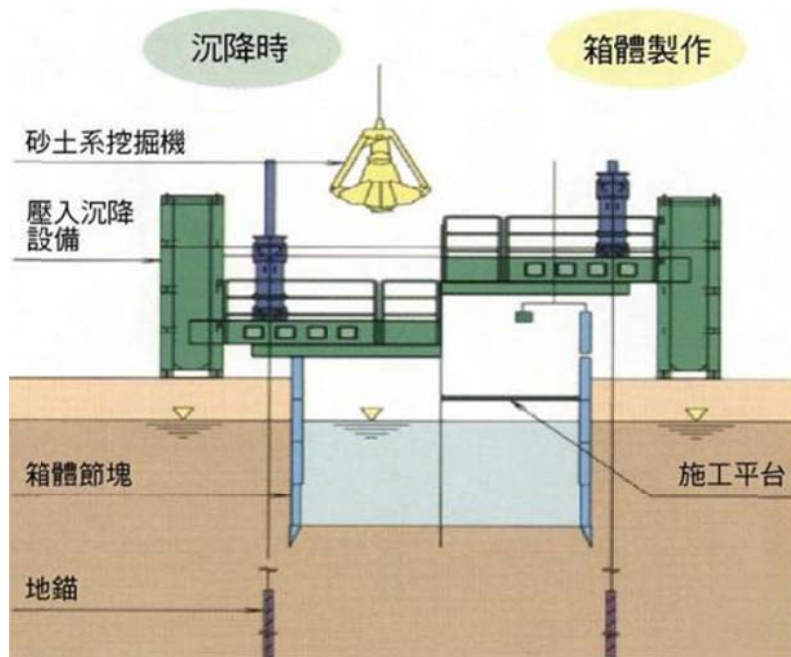


圖 2-5 壓入沉箱工法
(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)

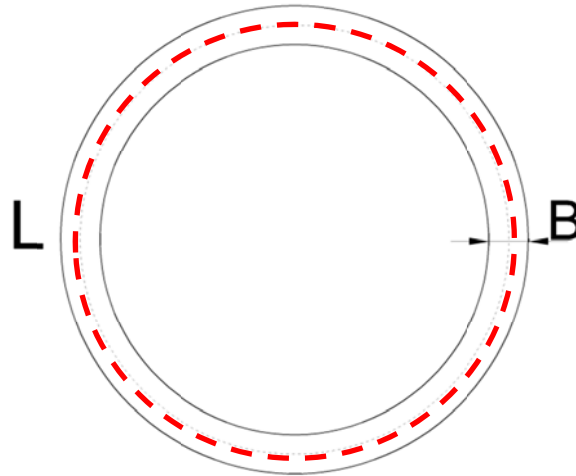


圖 2-6 式(2-2)圓形沉箱示意圖



圖 2-7 地錨連結至竹節形夾棒
(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)



圖 2-8 竹節形夾棒連結至千斤頂
(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)



圖 2-9 油壓千斤頂

(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)

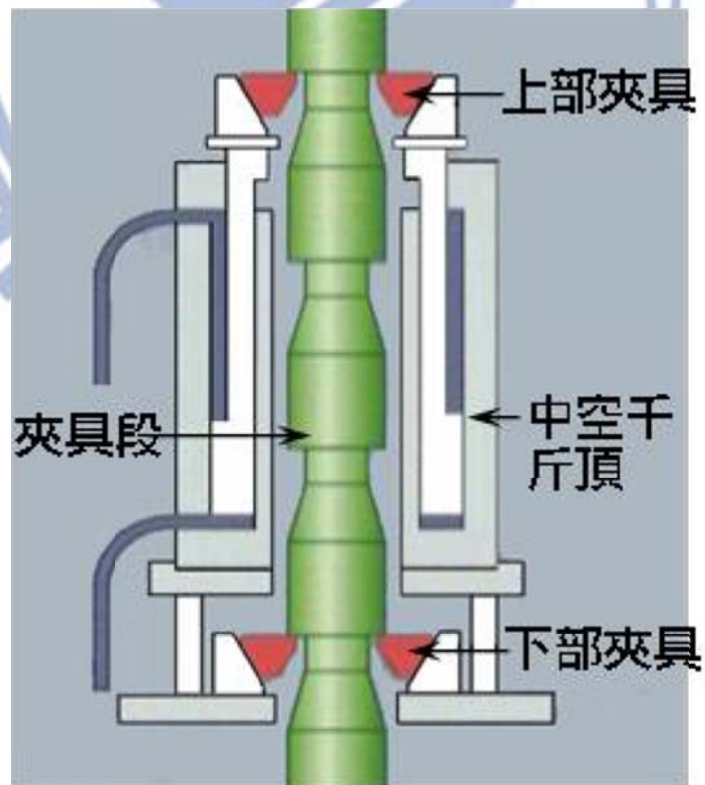


圖 2-10 千斤頂夾具示意圖

(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)



圖 2-11 千斤頂與加壓桁架
(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)



圖 2-12 加壓處鋪砂以均勻承載面之壓力
(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)



圖 2-13 沉箱外側之 NF 膜
(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)

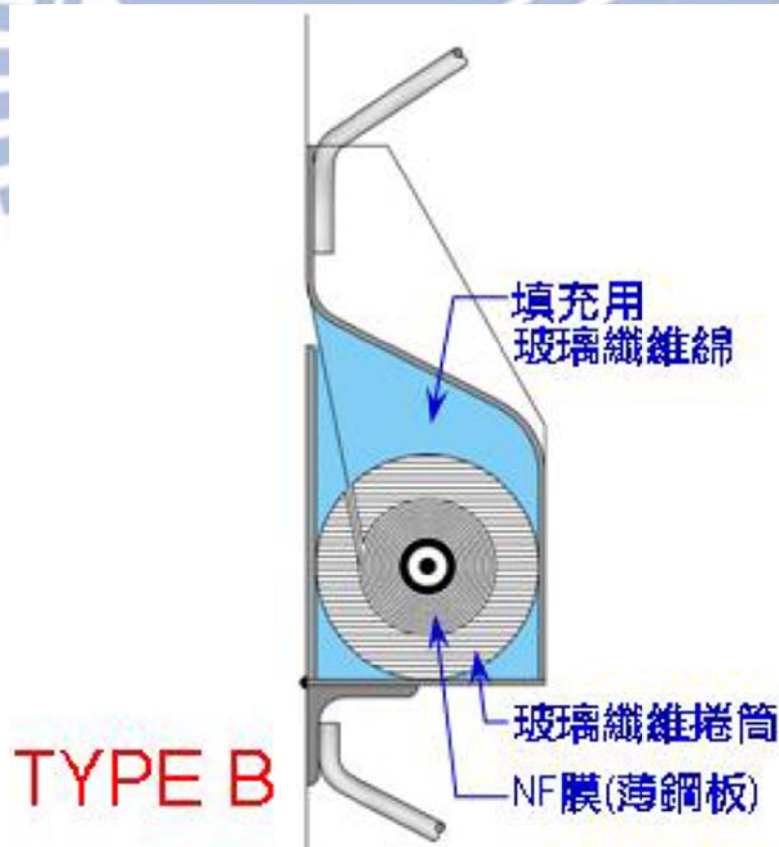


圖 2-14 裝 NF 鐵盒之示意圖
(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)



圖 2-15 安裝 NF 膜鐵盒
(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)



圖 2-16 沉箱壁外拉出之 NF 膜
(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)



(a) 設置箱體內噴流管



(b) 噴流孔與噴流孔外蓋

圖 2-17 噴流孔設置

(圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)

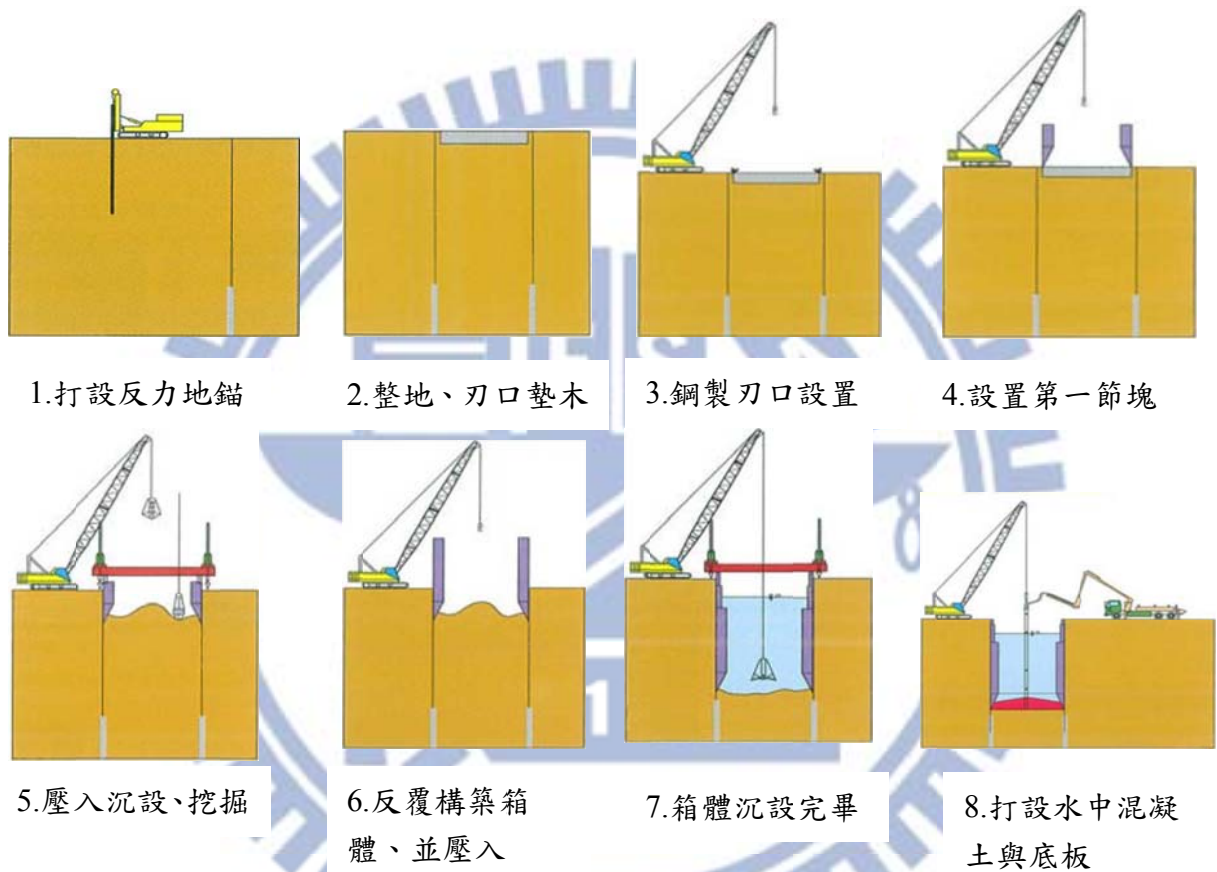


圖 2-18 壓入式沉箱施工流程
 (圖摘自台北市政府捷運工程局，2008)

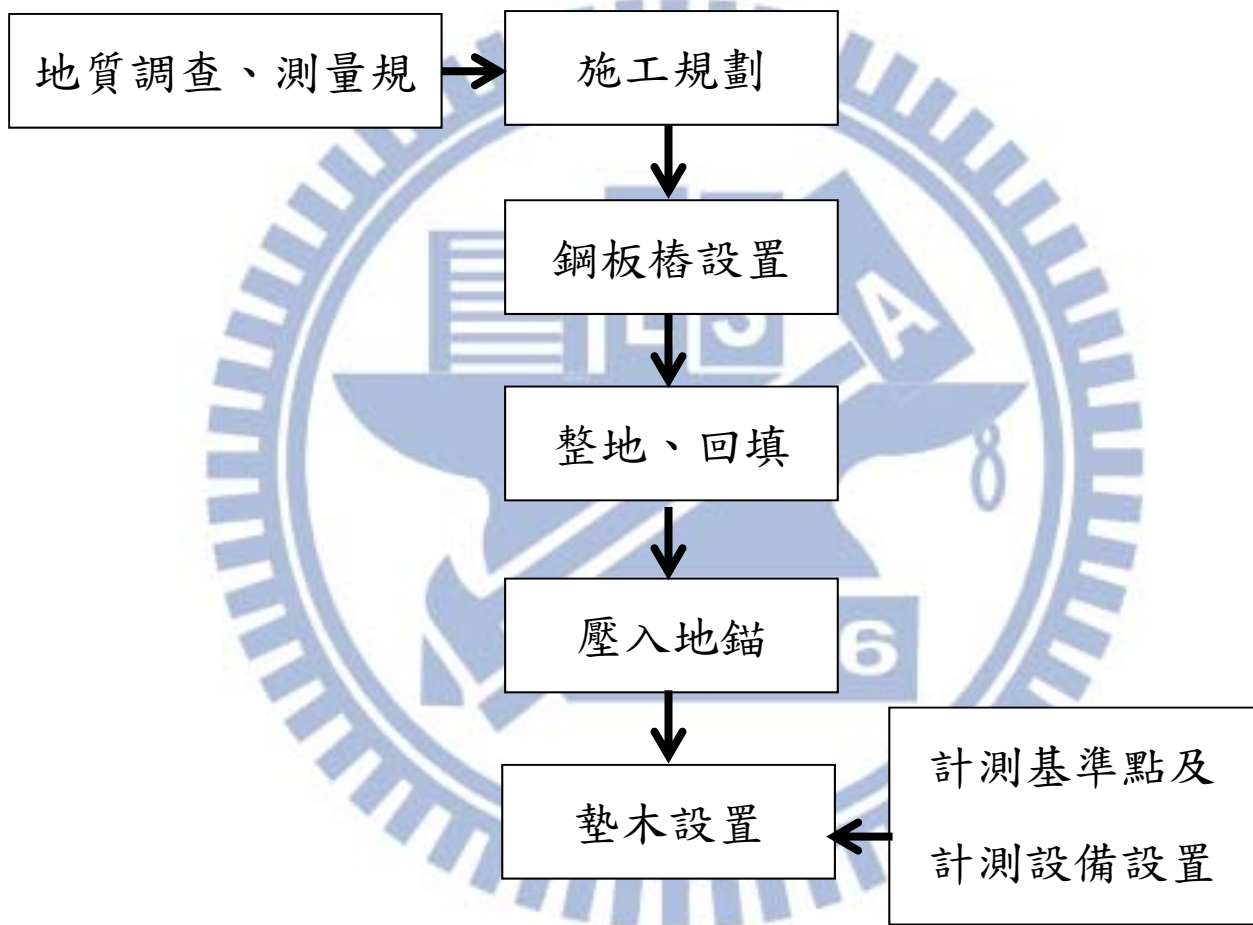


圖 2-19 壓入沉箱施工之前期作業流程
(摘自 台北市政府捷運工程局，2008)

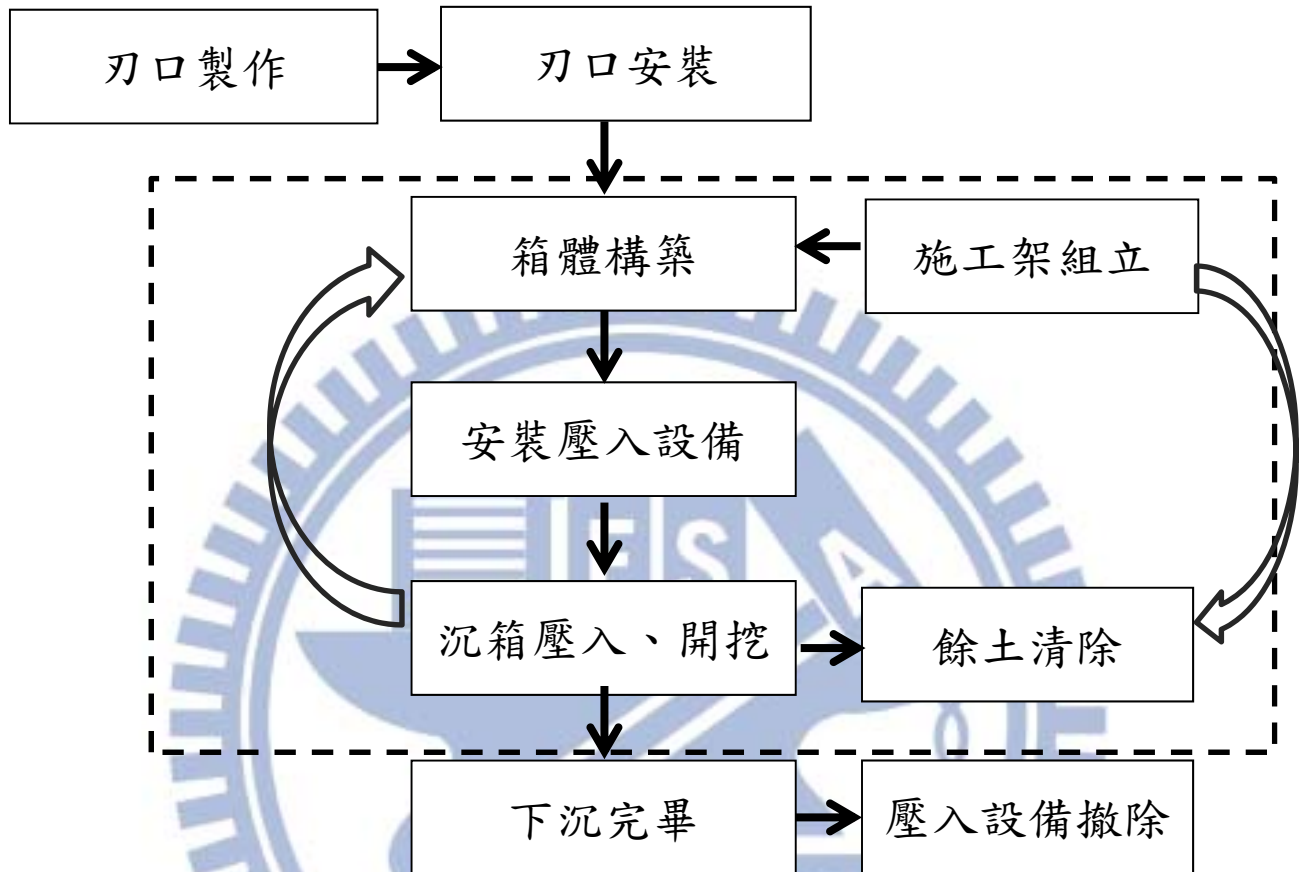


圖 2-20 沉箱壓入作業
 (摘自 台北市政府捷運工程局，2008)

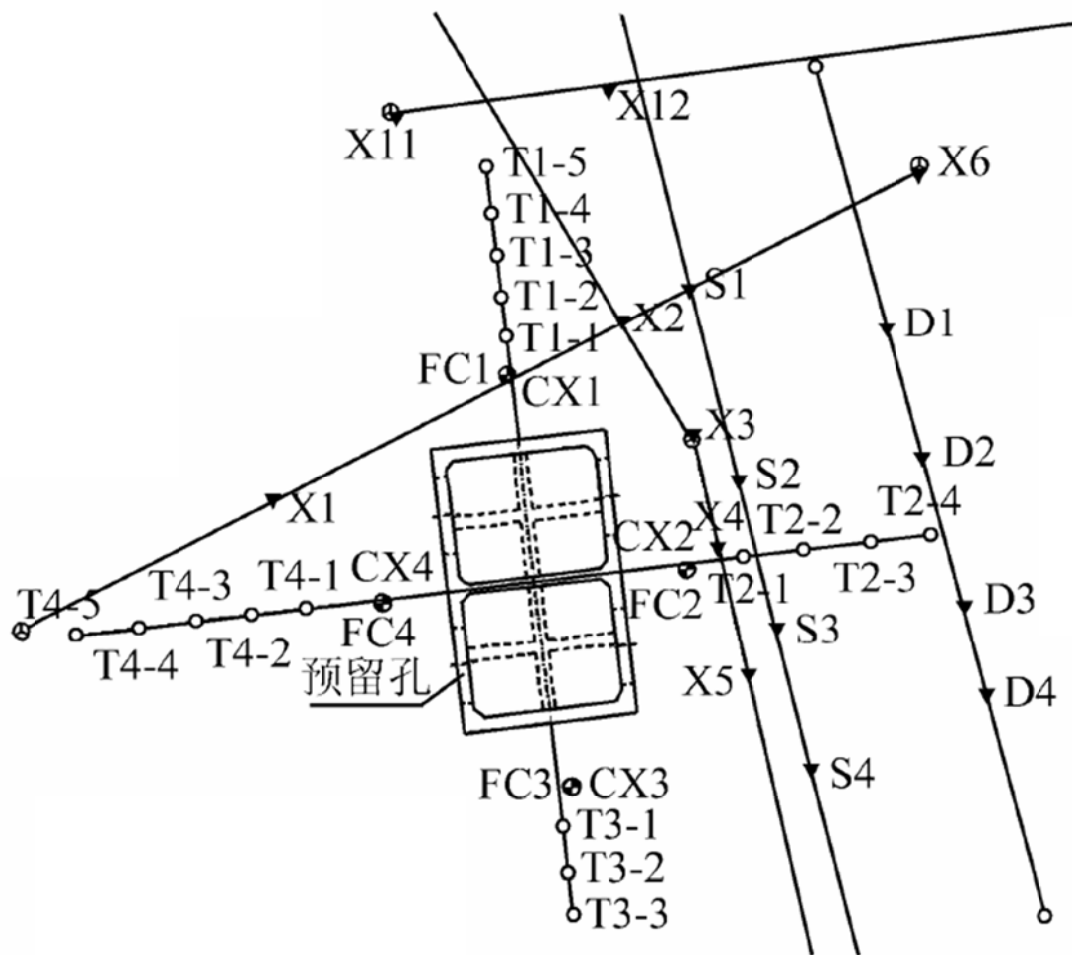


圖 2-21 上海沉箱沉陷點配置圖

(摘自徐鵬飛等人，2014)

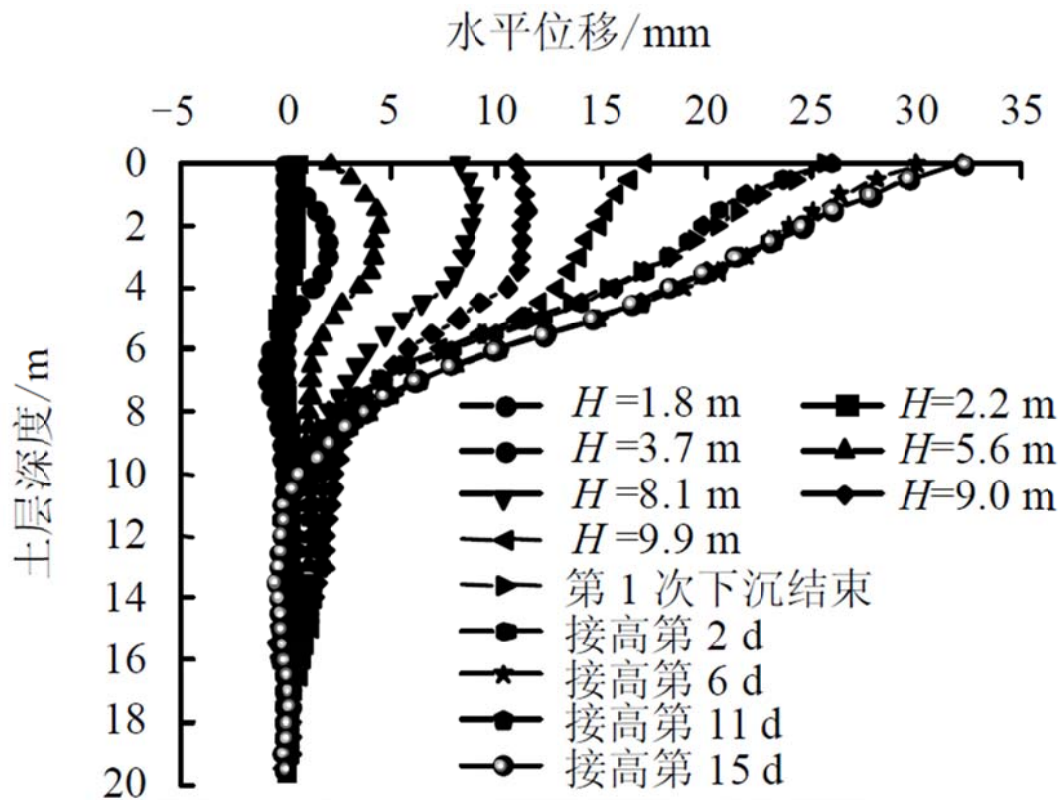


圖 2-22 沉箱下壓造成水平方向擠土效應
(摘自徐鵬飛等人，2014)

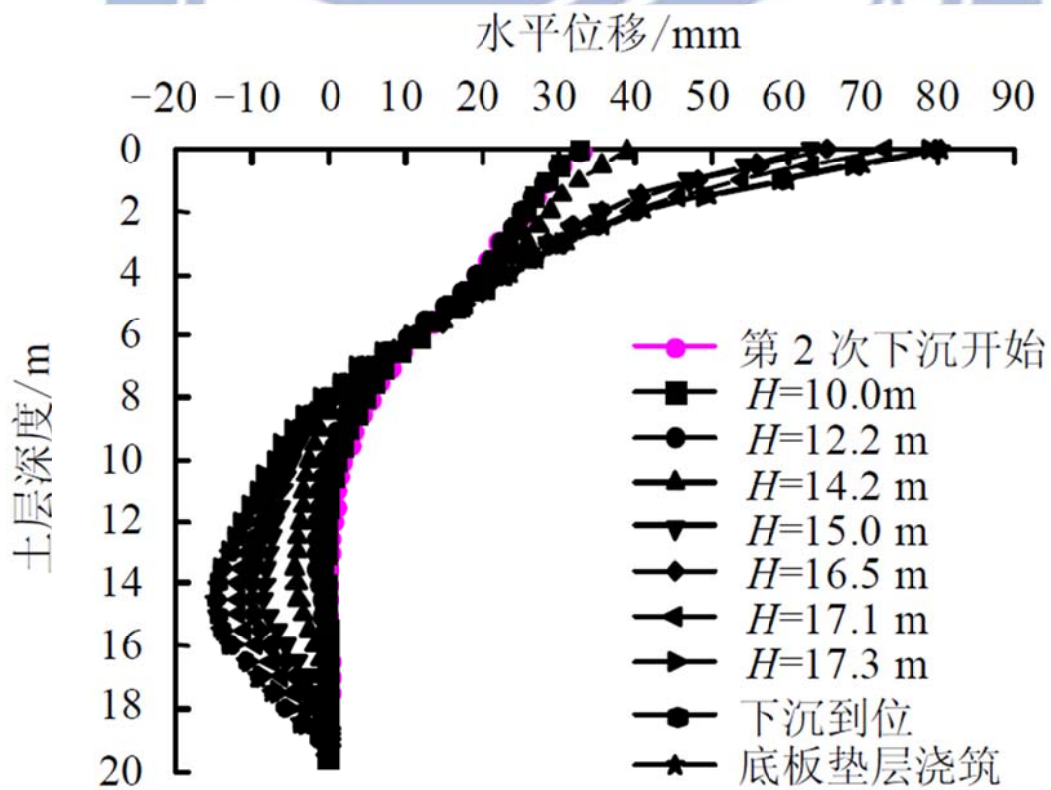


圖 2-23 沉箱下壓的後續影響
(摘自徐鵬飛等人，2014)

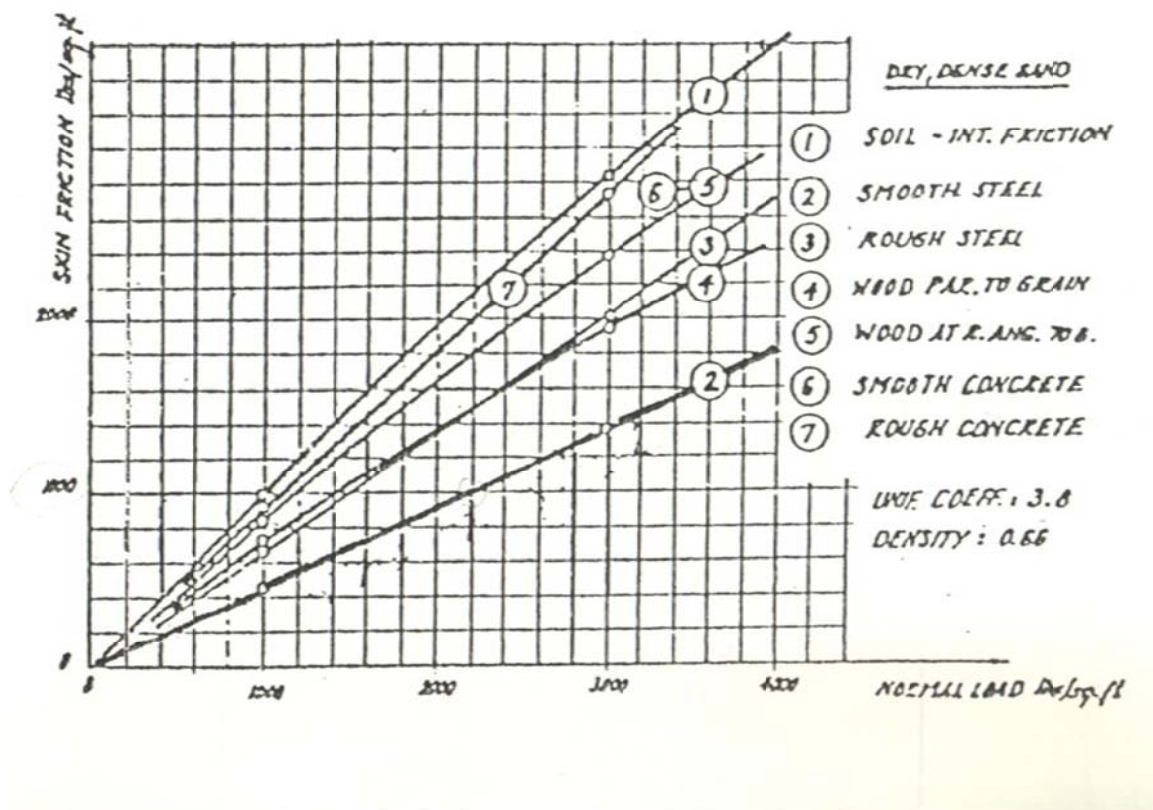


圖 2-24 乾砂與結構間摩擦力與垂直應力關係圖
(after Potyondy)

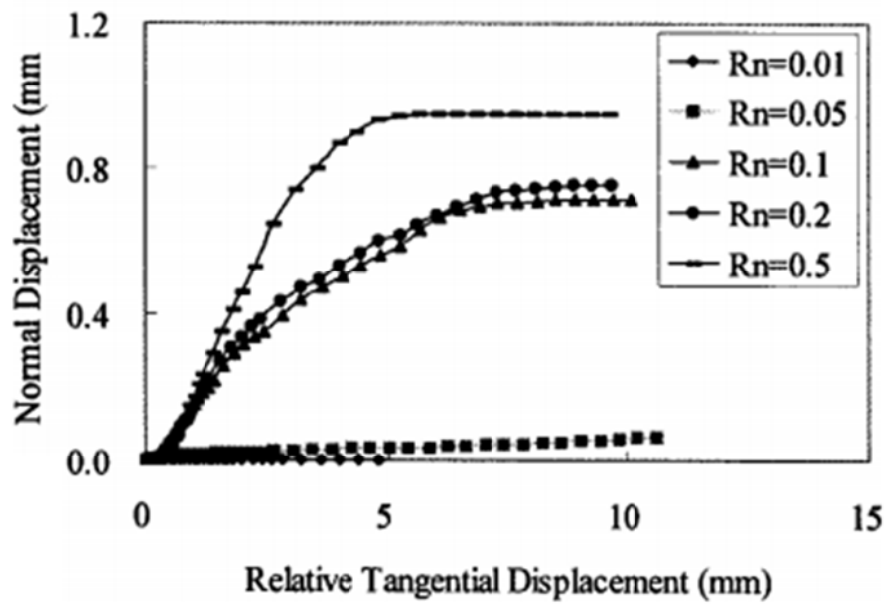
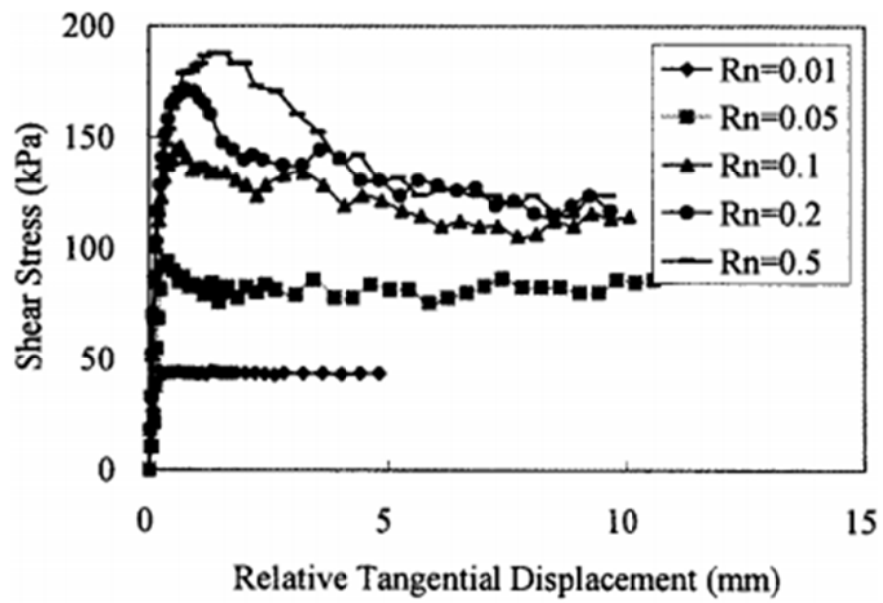


圖 2-25 不同粗糙度的鋼板與砂之摩擦力實驗
(after Hu 和 Pu, 2004)

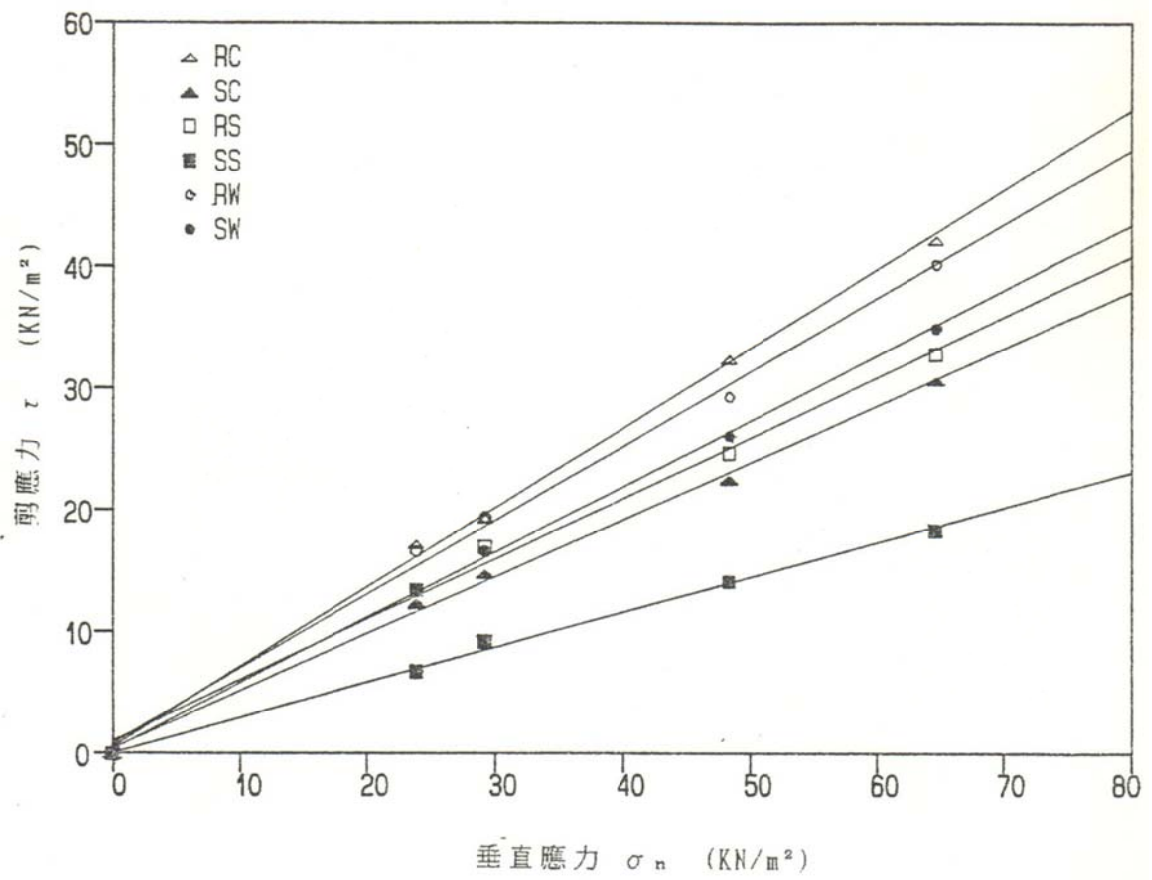


圖 2-26 乾砂與結構材料間剪應力與垂直應力關係圖

(摘自張崇義，1989)

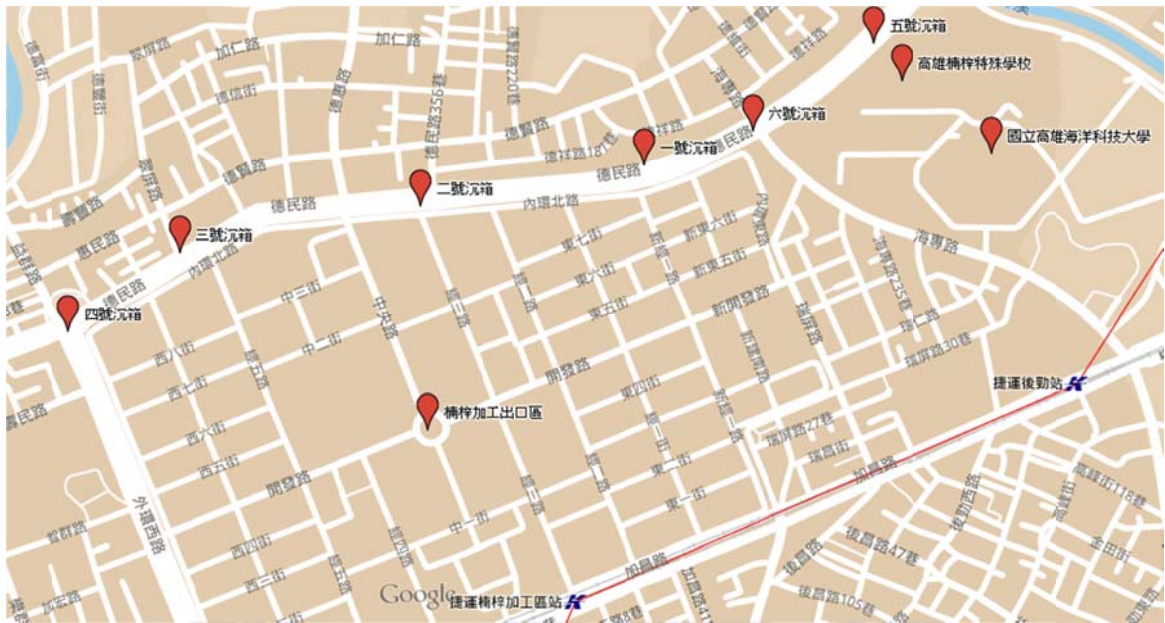


圖 3-1 高雄楠梓汙水主幹管六座沉箱分布位置



圖 3-2 一號沉箱位置(由東向西攝)
(摘自蔡惠文, 2011)



圖 3-3 二號沉箱位置(由東向西攝)
(摘自蔡惠文，2011)



圖 3-4 三號沉箱位置(由東向西攝)
(摘自蔡惠文，2011)



圖 3-5 四號沉箱位置(由東向西攝)
(摘自蔡惠文，2011)



(a)鋼板樁與夾具棒連結圖

(b)鋼板樁與夾具棒連結局部圖

圖 3-6 鋼板樁與千斤頂連接方式
(摘自蔡惠文，2011)



圖 3-7 五號沉箱位置(由西向東攝)
(摘自蔡惠文，2011)



圖 3-8 六號沉箱位置(由東向西攝)
(摘自蔡惠文，2011)

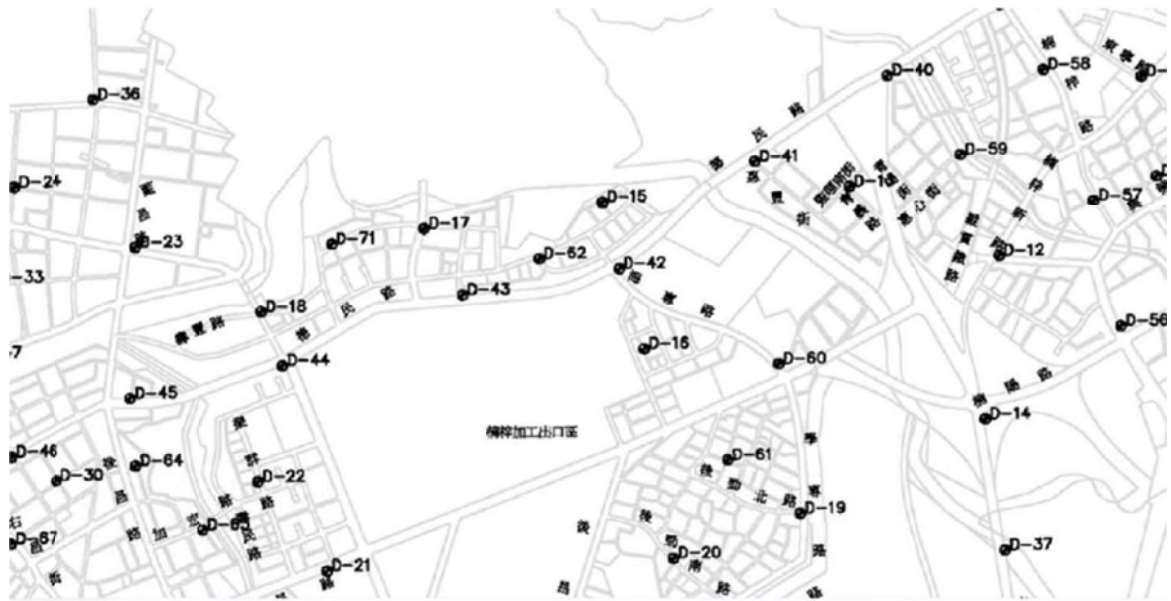


圖 3-9 鑽探孔位分布圖
(摘自蔡惠文, 2011)

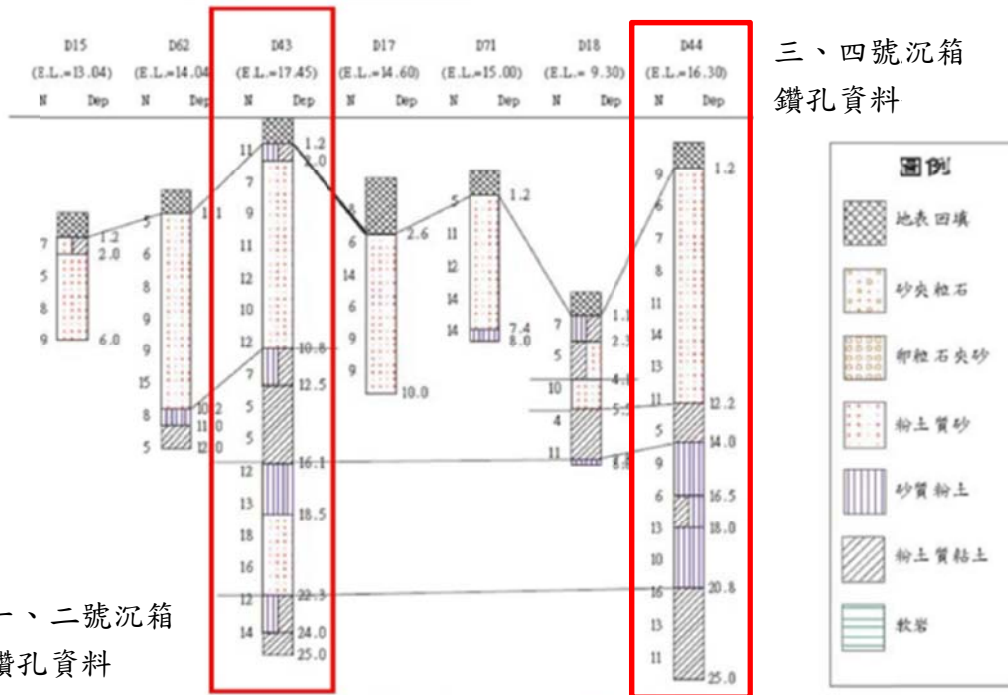


圖 3-10 一、二、三、四號沉箱鑽探柱狀圖
(摘自蔡惠文, 2011)

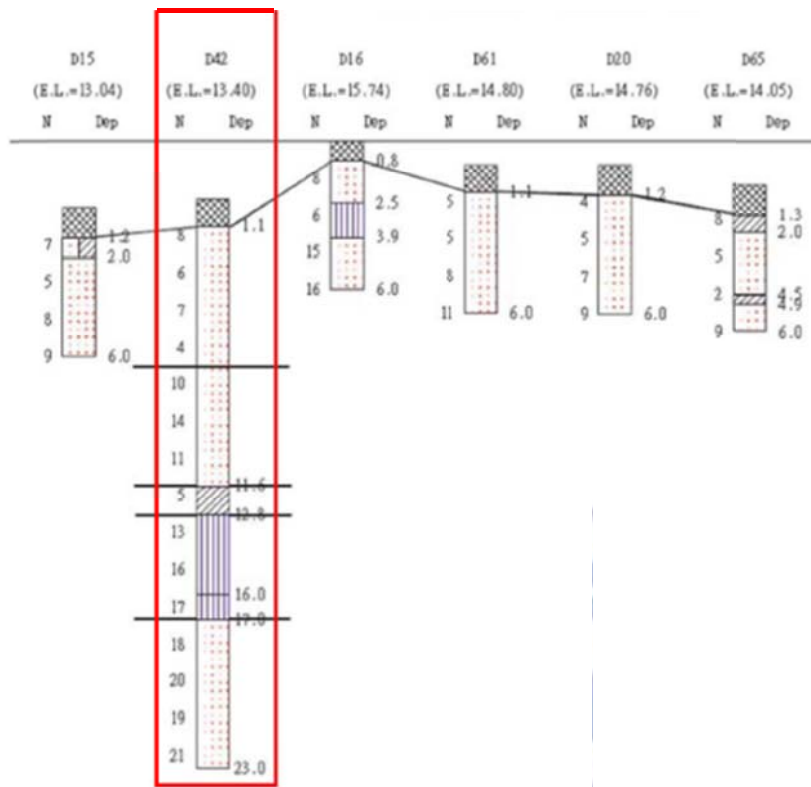


圖 3-11 五、六號壓入沉箱鑽探柱狀圖
(摘自蔡惠文, 2011)



圖 3-12 三號沉箱施工導致放流管挫曲
(摘自蔡惠文, 2011)



圖 3-13 三號沉箱施工導致鄰近地盤沉陷及路面掏空
(摘自蔡惠文, 2011)



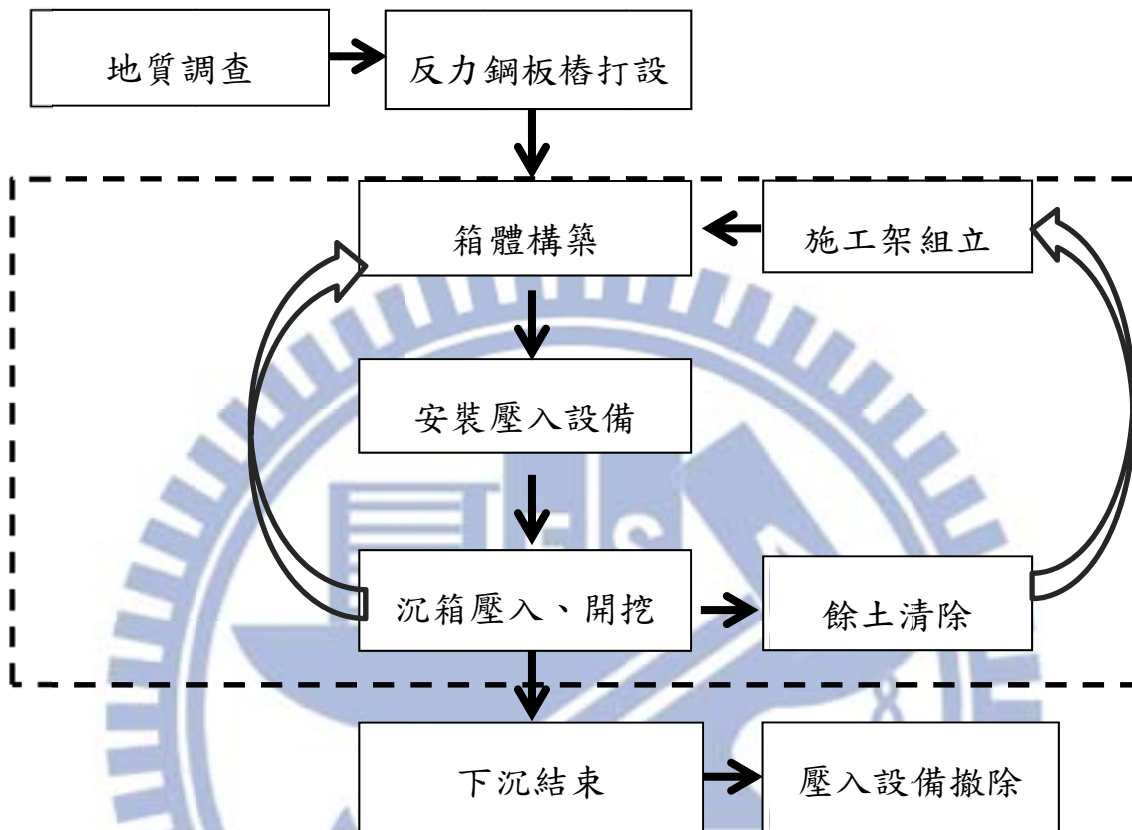


圖 3-14 一、二沉箱施工流程



圖 3-15 高雄一號沉箱施工現場
(摘自蔡惠文, 2011)



圖 3-16 反力鋼板樁上浮
(摘自蔡惠文, 2011)

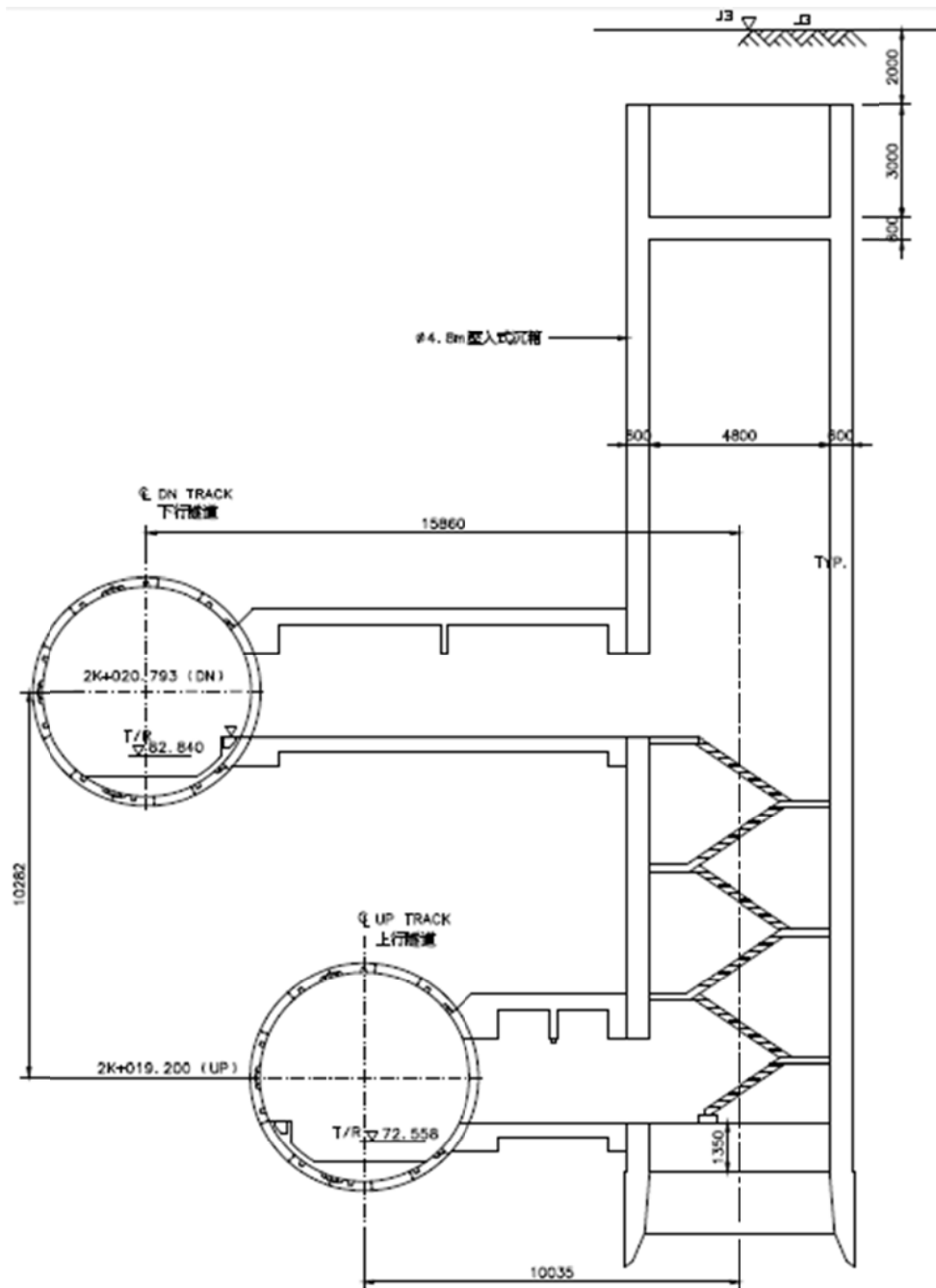


圖 3-17 蘆洲線 CL700A 聯絡通道
 (摘自台北市政府捷運工程局，2008)



圖 3-18 蘆洲線 CL700A 壓入沉箱位置
 (摘自陳聯獻等人，2009)

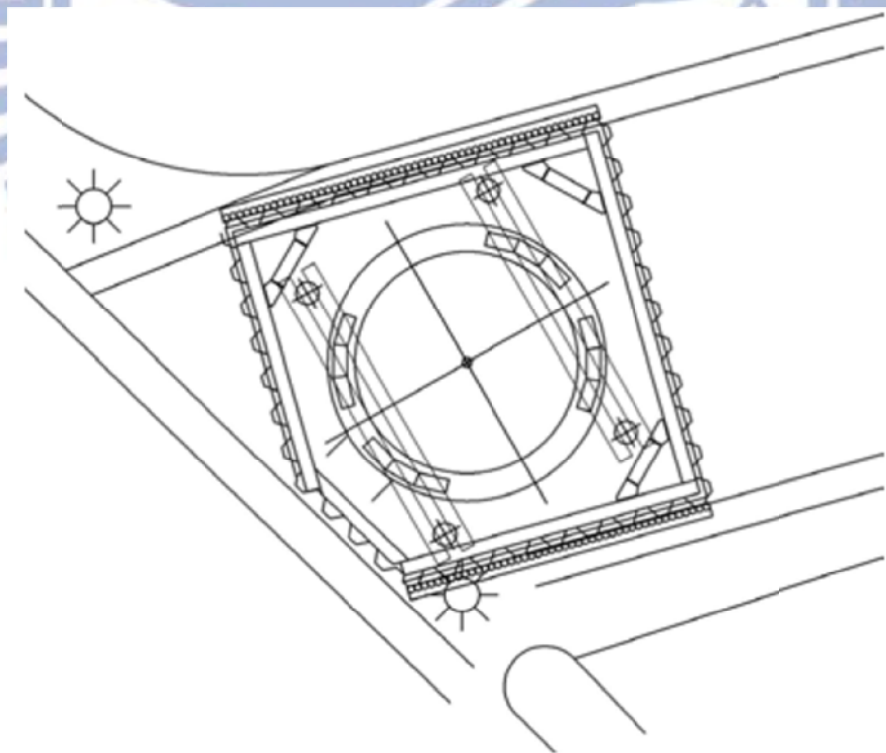


圖 3-19 蘆洲線 CL700A 壓入沉箱鄰房保護配置
 (摘自台北市政府捷運工程局，2008)

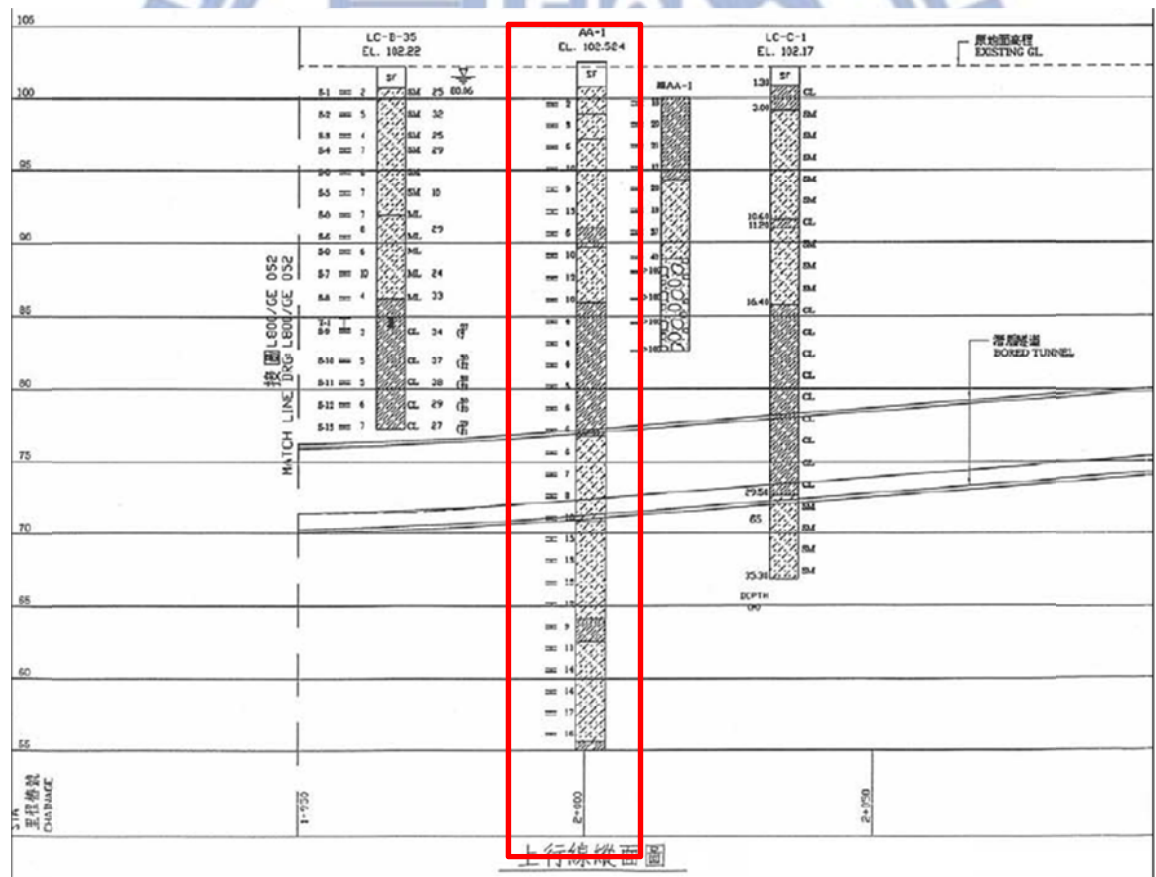
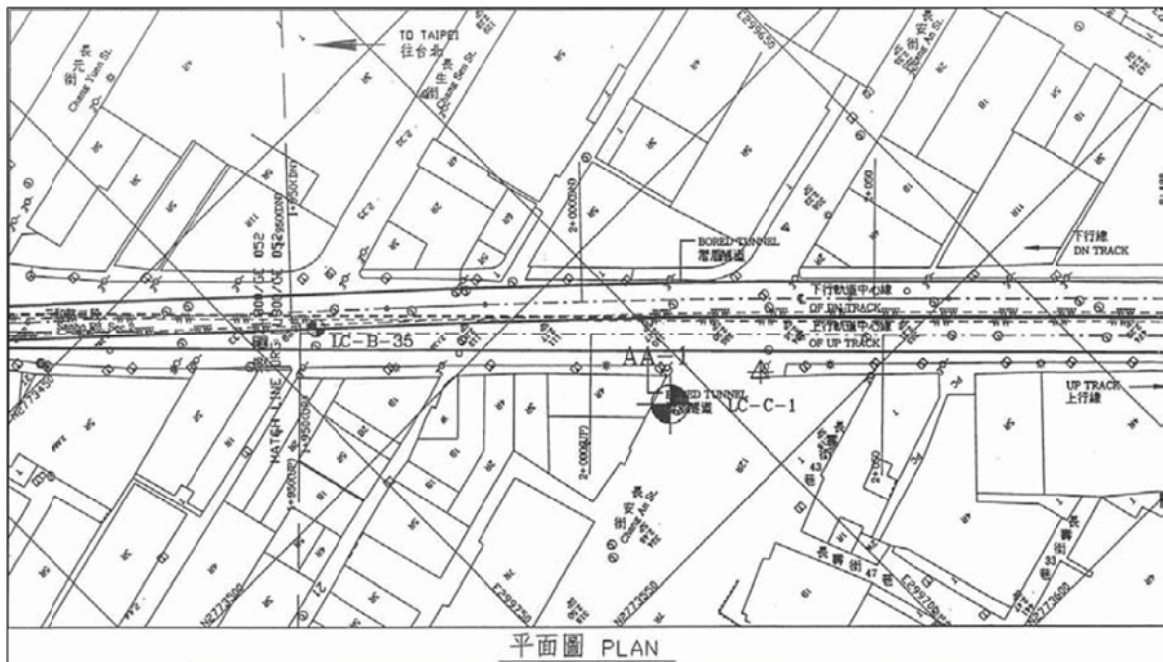


圖 3-20 蘆洲線 CL700A 附近鑽探孔位分布與柱狀圖
(摘自台北捷運市政府，2008)

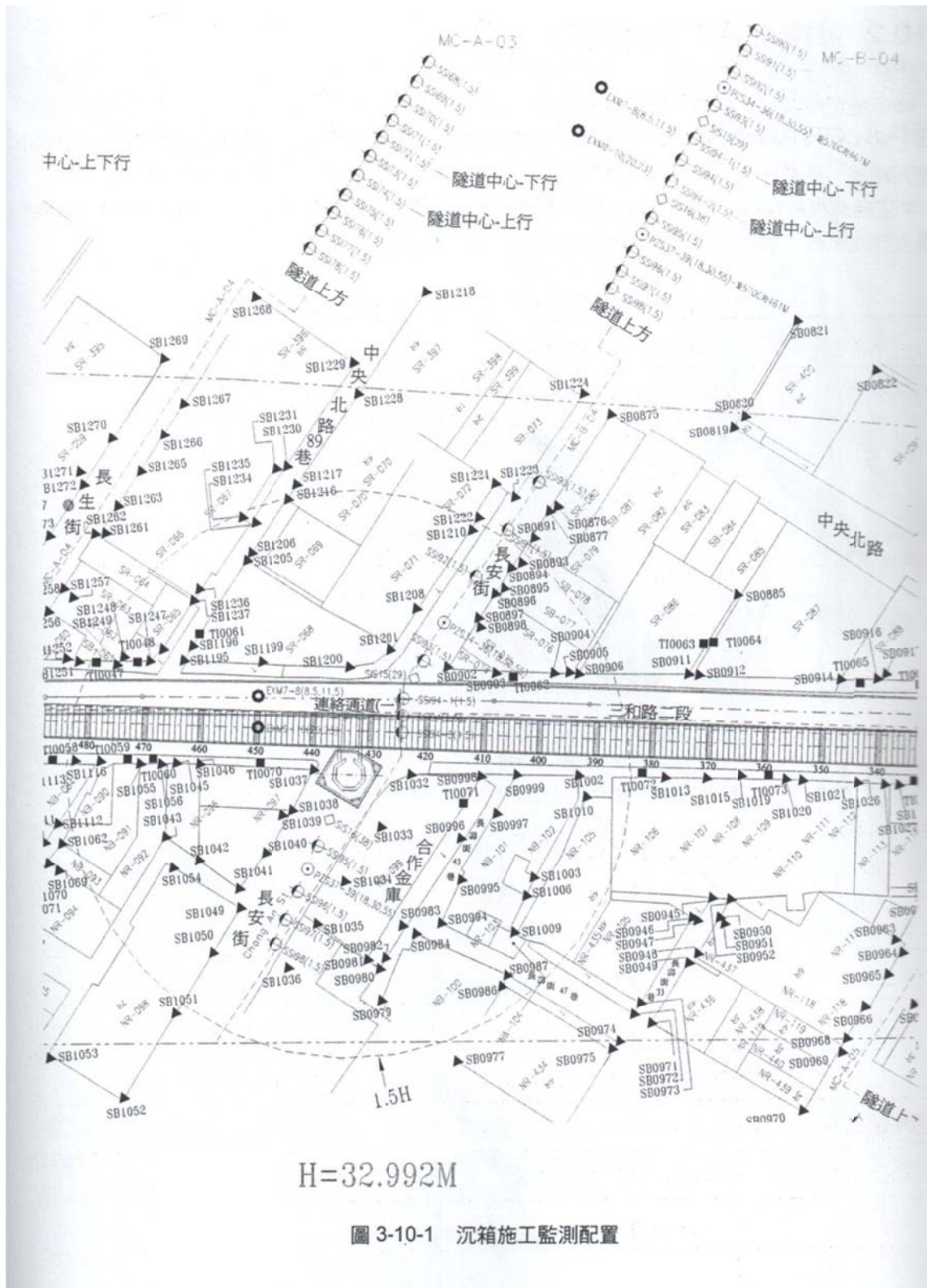


圖 3-21 CL700 壓入式沉箱監測儀器配置
 (摘自台北市政府捷運局，2008)

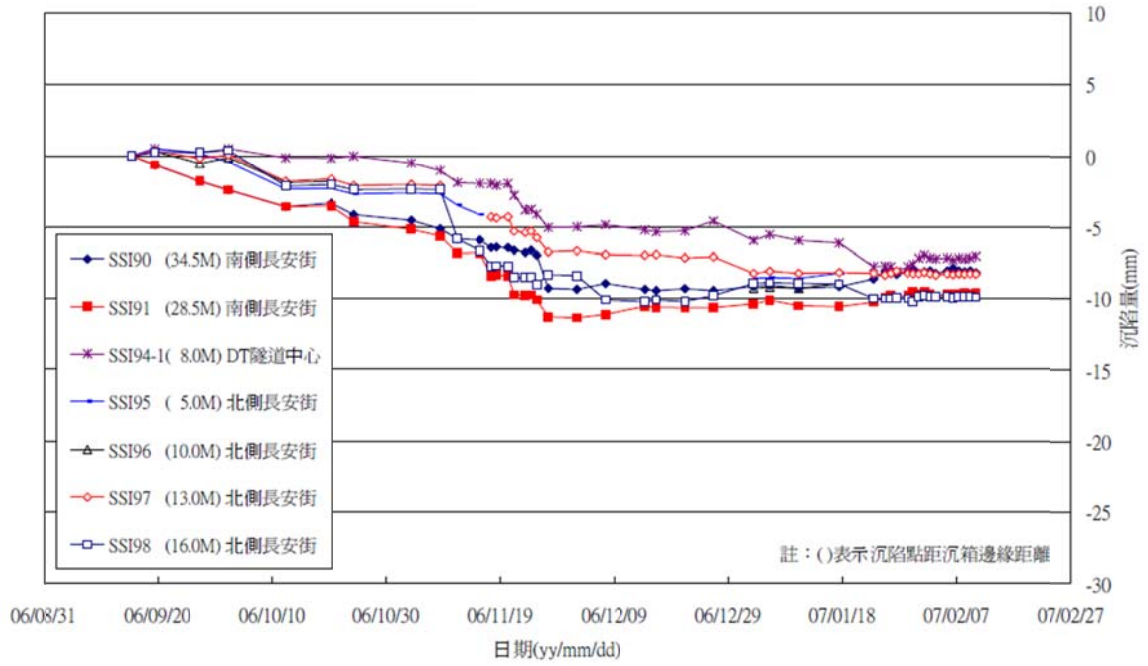


圖 3-22 CL700A 壓入式沉箱周圍沉陷量
(摘自台北捷運，2008)



圖 3-23 二號沉箱的不均勻沉陷
(摘自蔡惠文，2011)

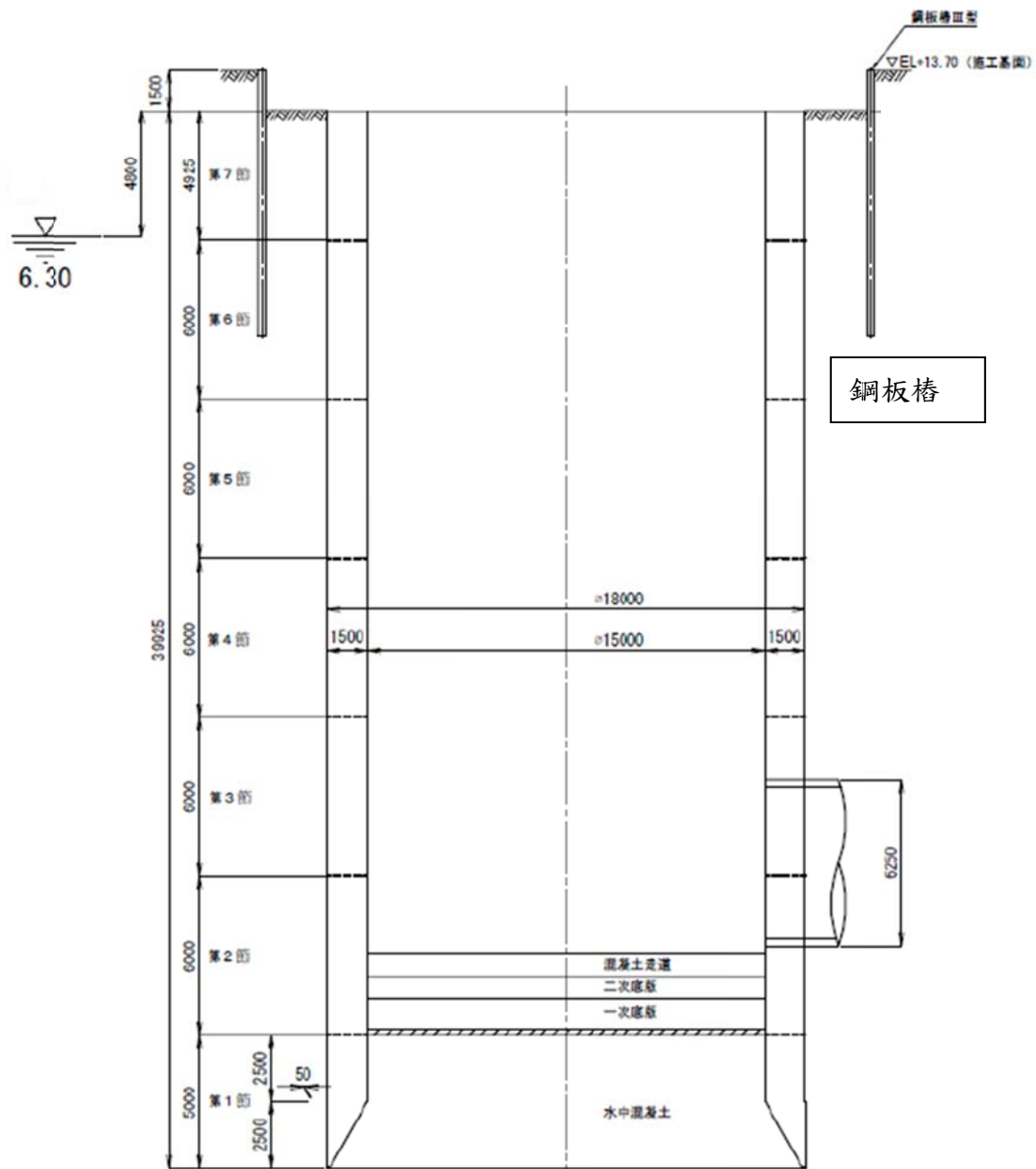


圖 4-1 沉箱剖面圖

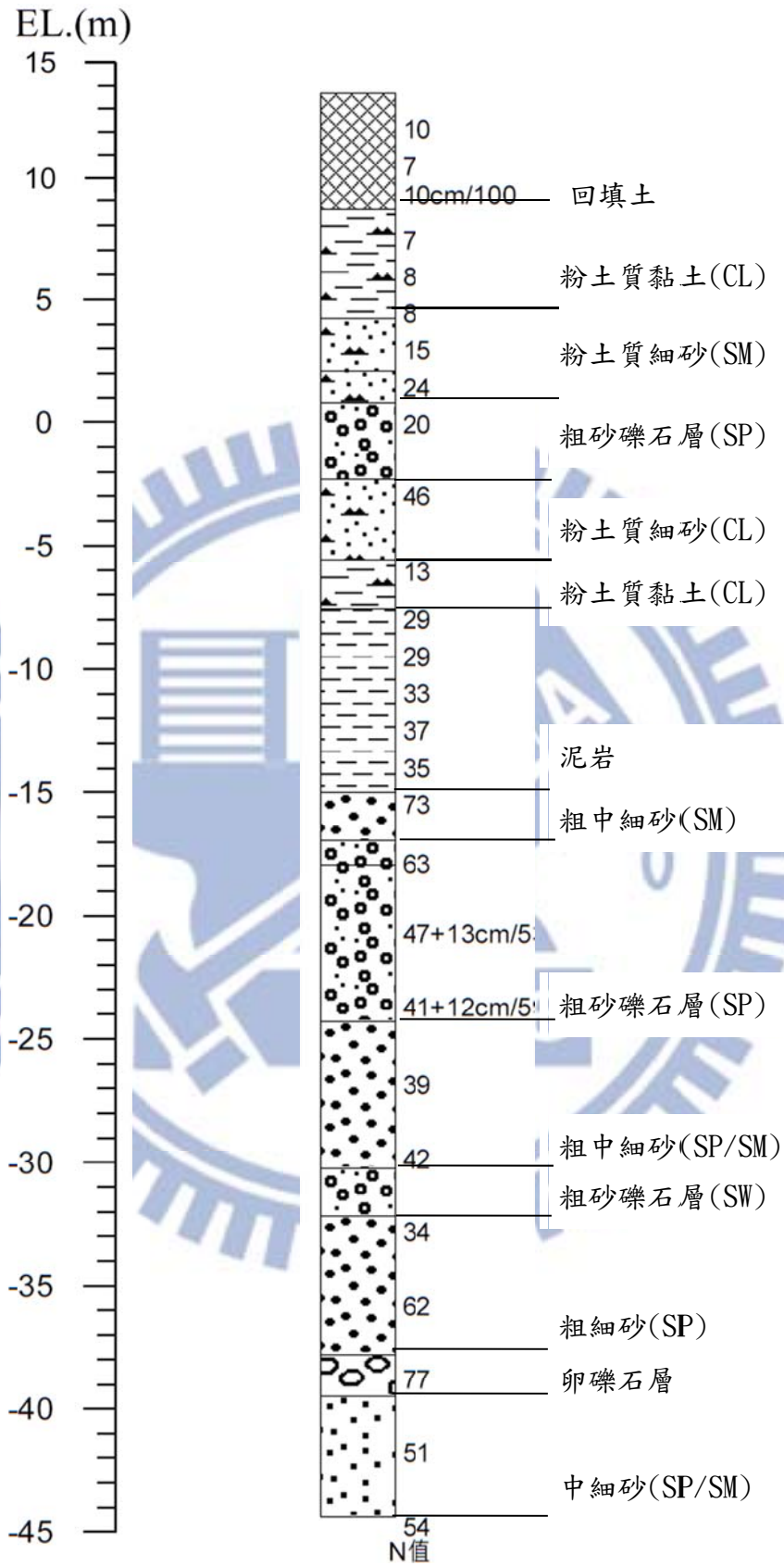


圖 4-2(a) 高雄壓入沉箱 BH21 鑽孔柱狀圖

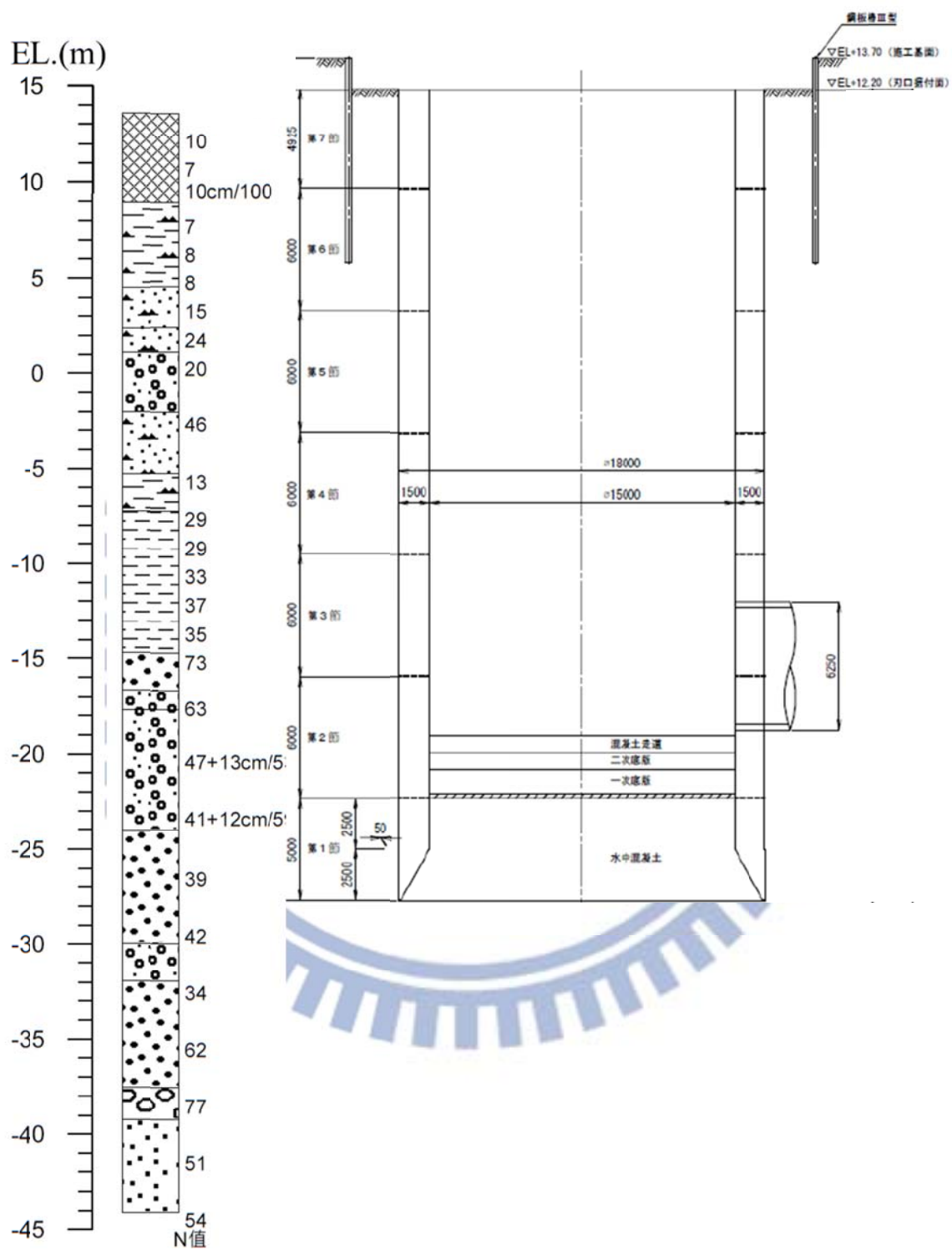


圖 4-2(b) 沉箱與地層關係圖



圖 4-3 於降挖地面上施作地錨



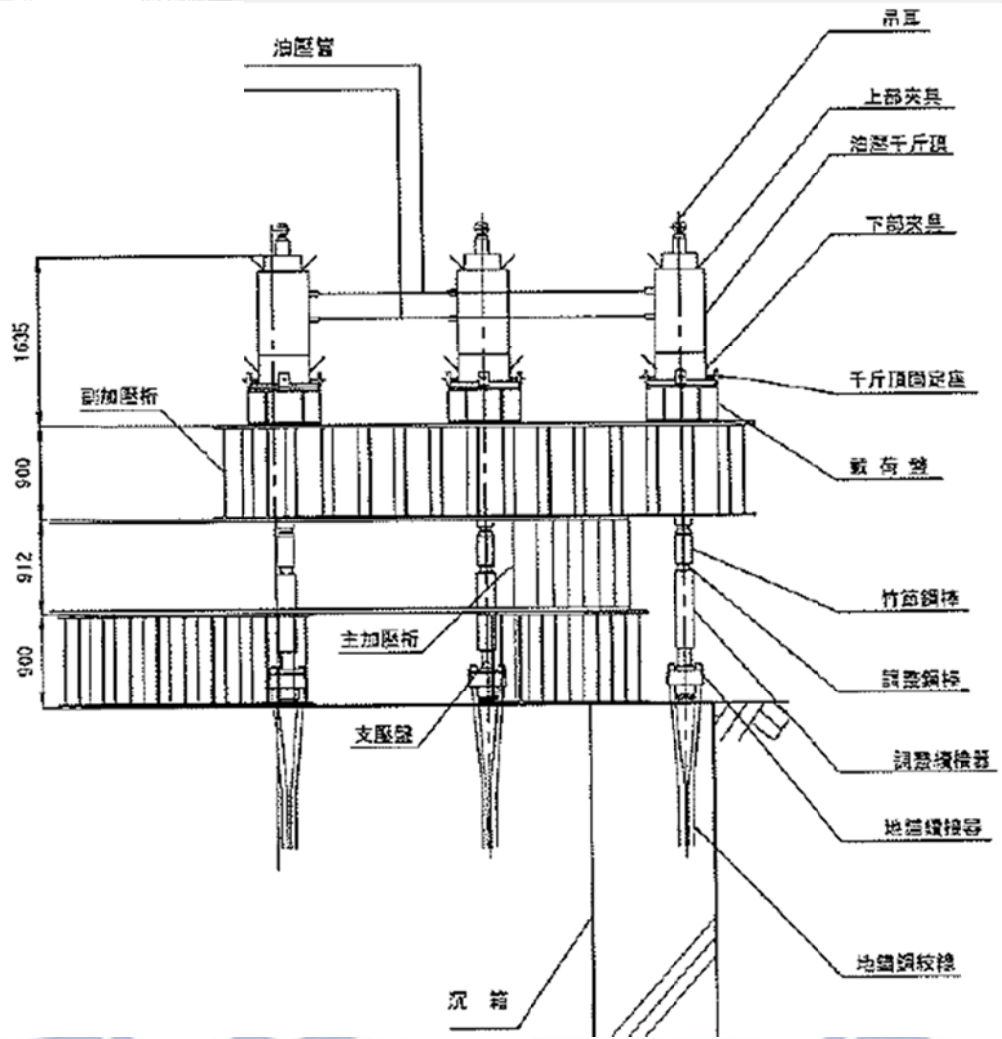


圖 4-4 反力加壓系統示意圖



圖 4-5 壓入沉箱反力系統



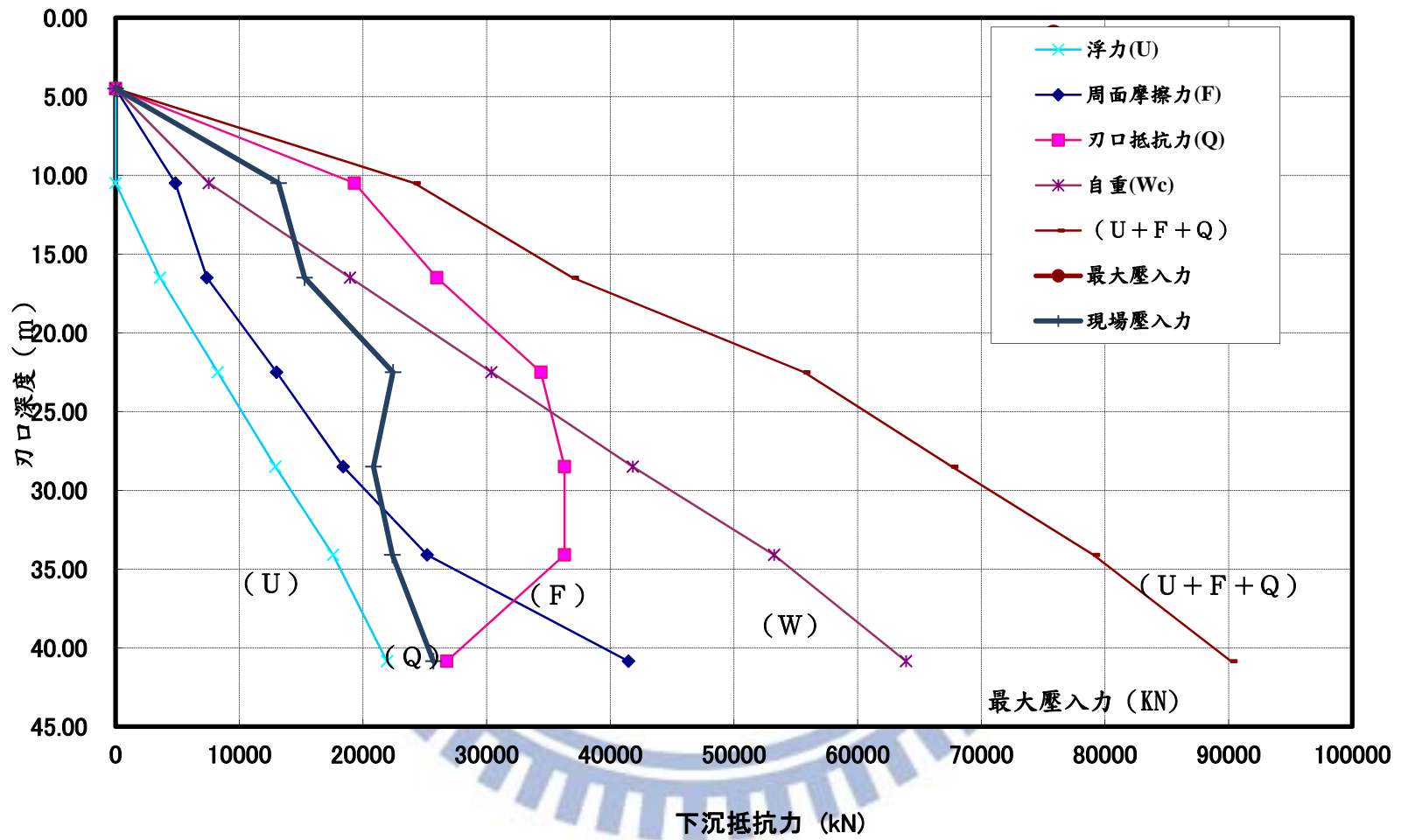


圖 4-6 壓入力計算

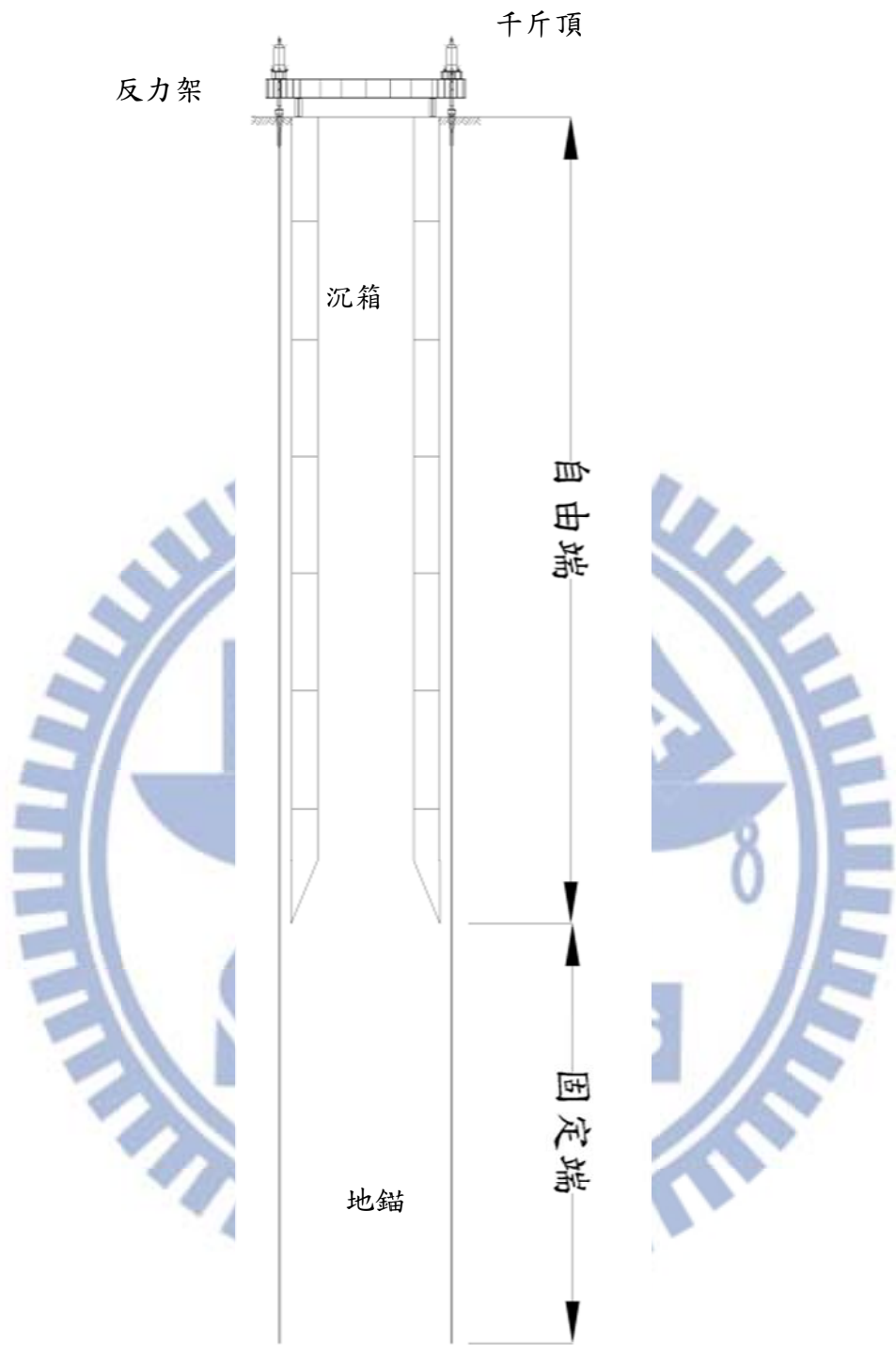


圖 4-7 地錨的固定端與自由端示意圖

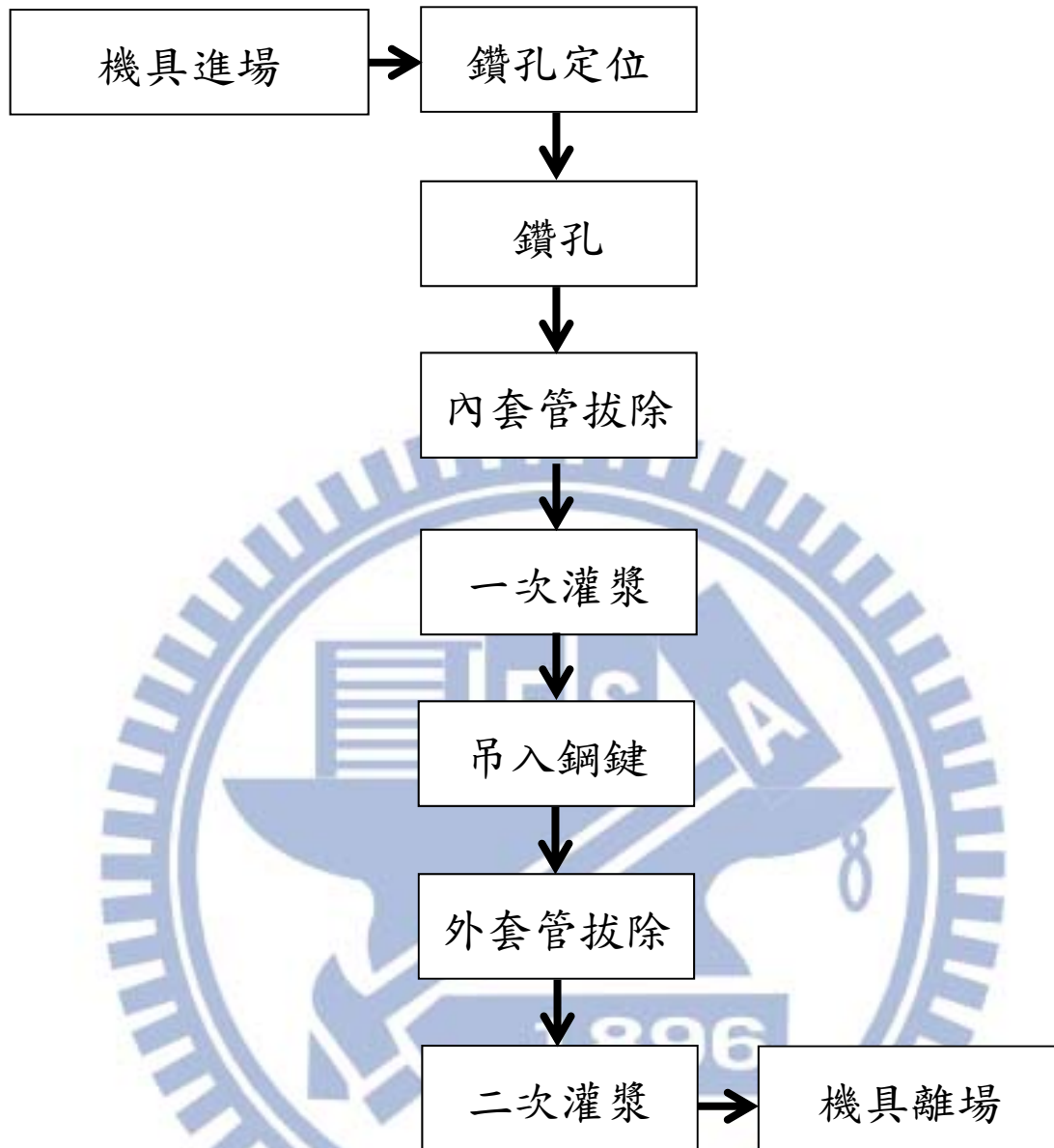
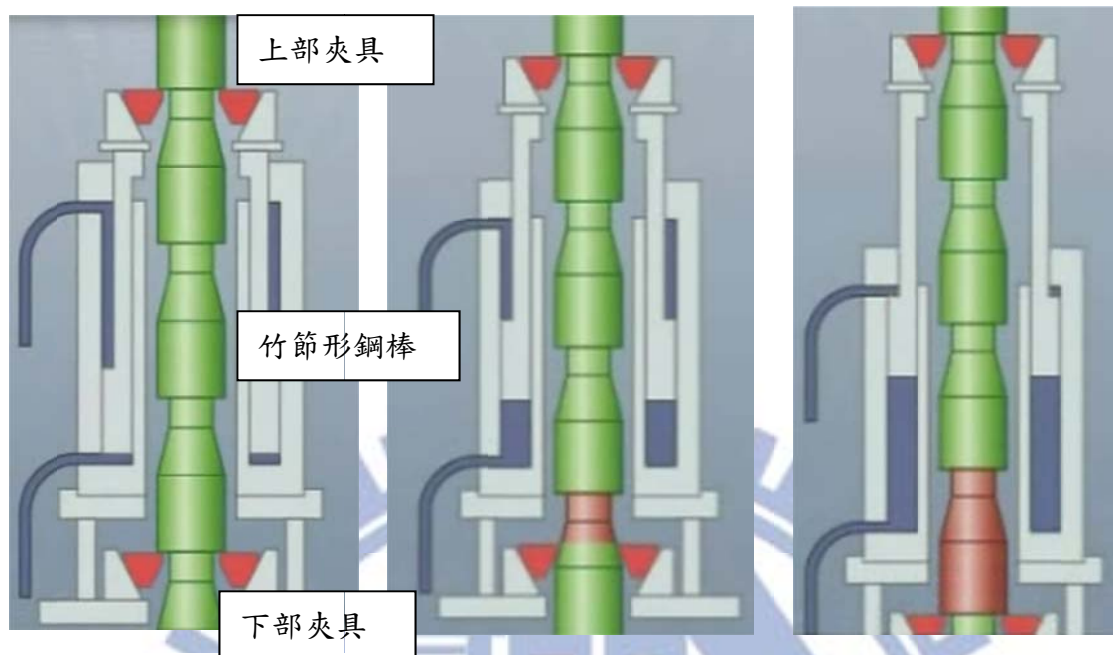


圖 4-8 地錨施工流程圖



圖 4-9 中空油壓千斤頂

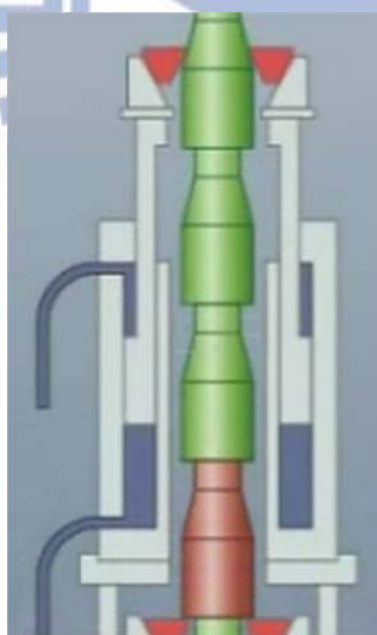




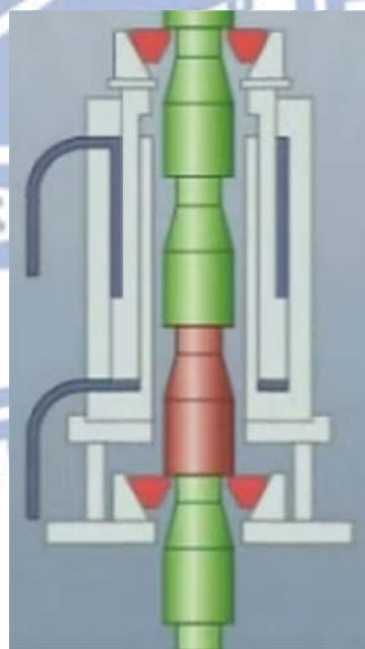
(a) 上部夾具固定，下部夾具鬆開，開始下壓

(b) 壓入第一節

(c) 壓入完畢，下部夾具固定，上部夾具鬆開往下



(d) 上部夾具往下



(e) 回復原來狀態，上部夾具固定，下部夾具鬆開，開始下一節下壓

圖 4-10 千斤頂壓入流程圖



圖 4-11 竹節鋼棒與地錨之連接處



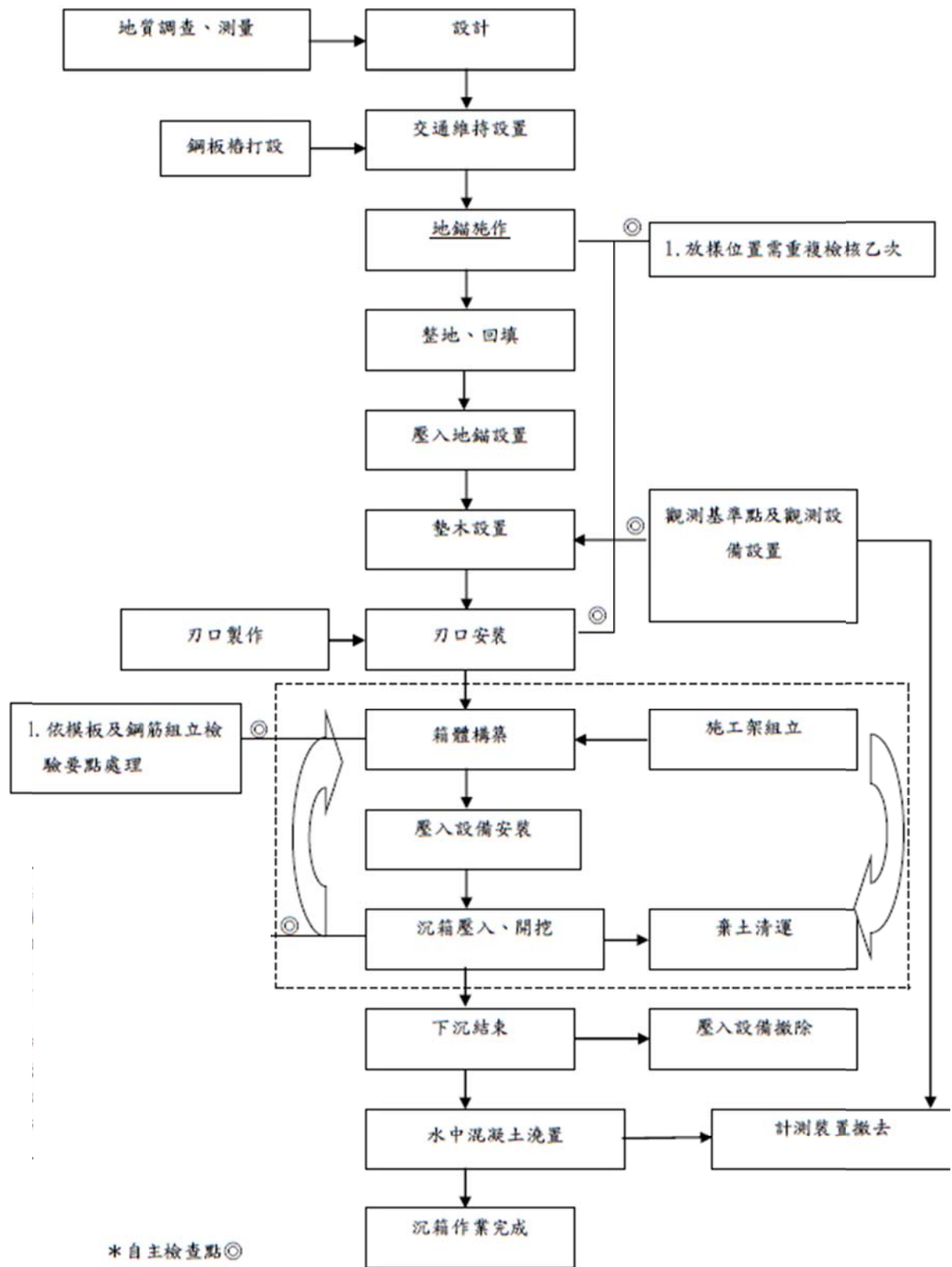


圖 4-12 沉箱施工壓入流程圖

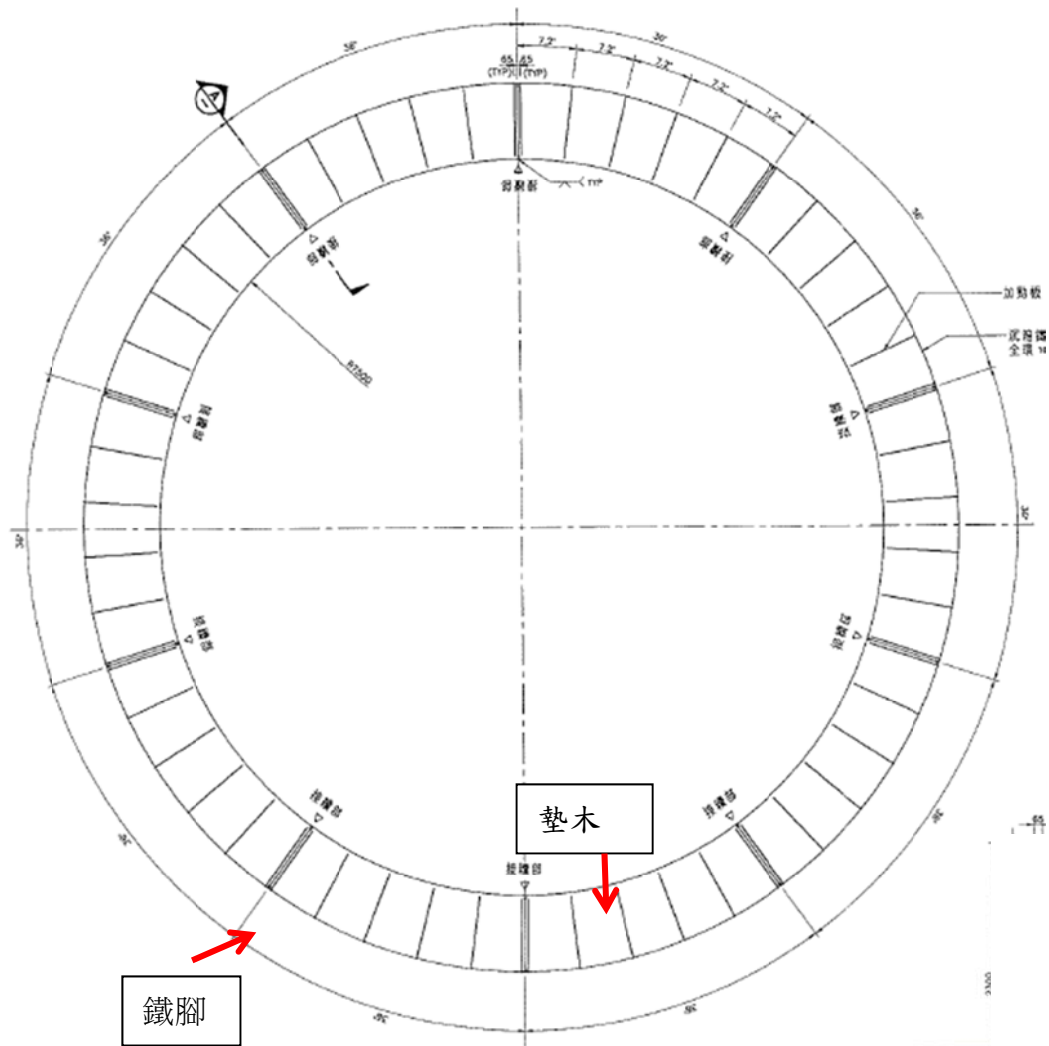


圖 4-13 墊木及鐵腳鋪設平面圖



圖 4-14 墊木鋪設示意圖



圖 4-15 墊木上的鐵腳

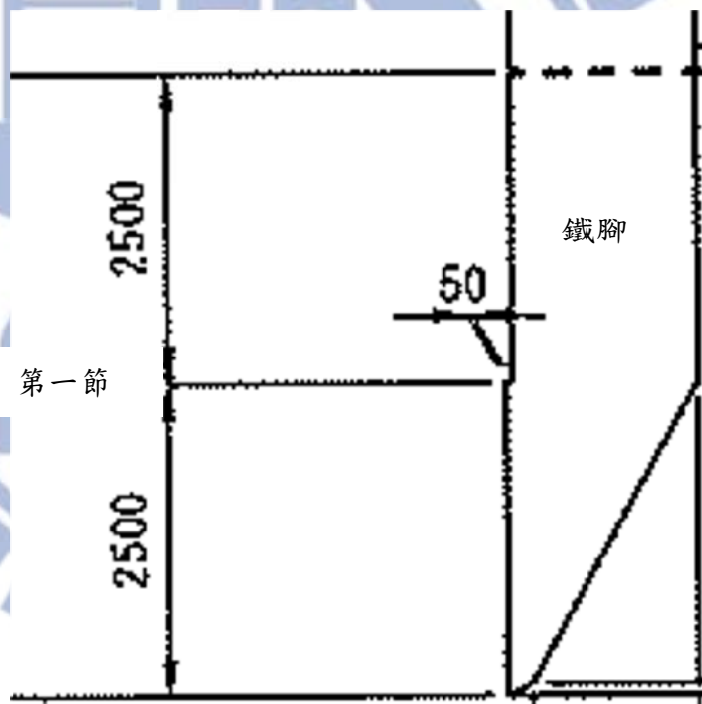


圖 4-16 沉箱鐵腳處局部放大圖



圖 4-17 焊在鐵腳上內裝 NF 膜的鐵盒



圖 4-18 掛於第一層沉箱上的 NF 膜



圖 4-19 置於沉箱旁之 NF 膜



(a) 綁紮鋼筋

(b) 澆製箱體混凝土

圖 4-20 高雄壓入沉箱第二昇層箱體製作



圖 4-21 水中開挖





圖 4-22(a) 噴流管上預留氣體噴射管道的保麗龍塊



圖 4-22(b) 箱壁上的噴流孔



(a) 空壓機

(b) 噴氣管

圖 4-23 空壓機與連結到不同昇層的噴流管





(a) 設備吊入水中圖

(b) 設備近照

圖 4-24 高壓水柱清洗鐵腳



圖 4-25 以水中攝影機確認鐵腳處淤泥清洗完成



(a) 沉箱上方鋪設鋼板形成工作平台



(b) 特密館內以橡皮碗確保混凝土不會於管內與水混合



(c) 以特密管澆置水中混凝土

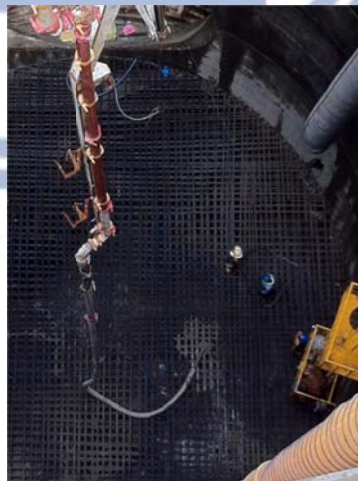


(d) 確認水中混凝土深度

圖 4-26 水中混凝土澆置



(a) 底板鋼筋綁紮



(a) 底板混凝土澆置

圖 4-27 沉箱底板施工

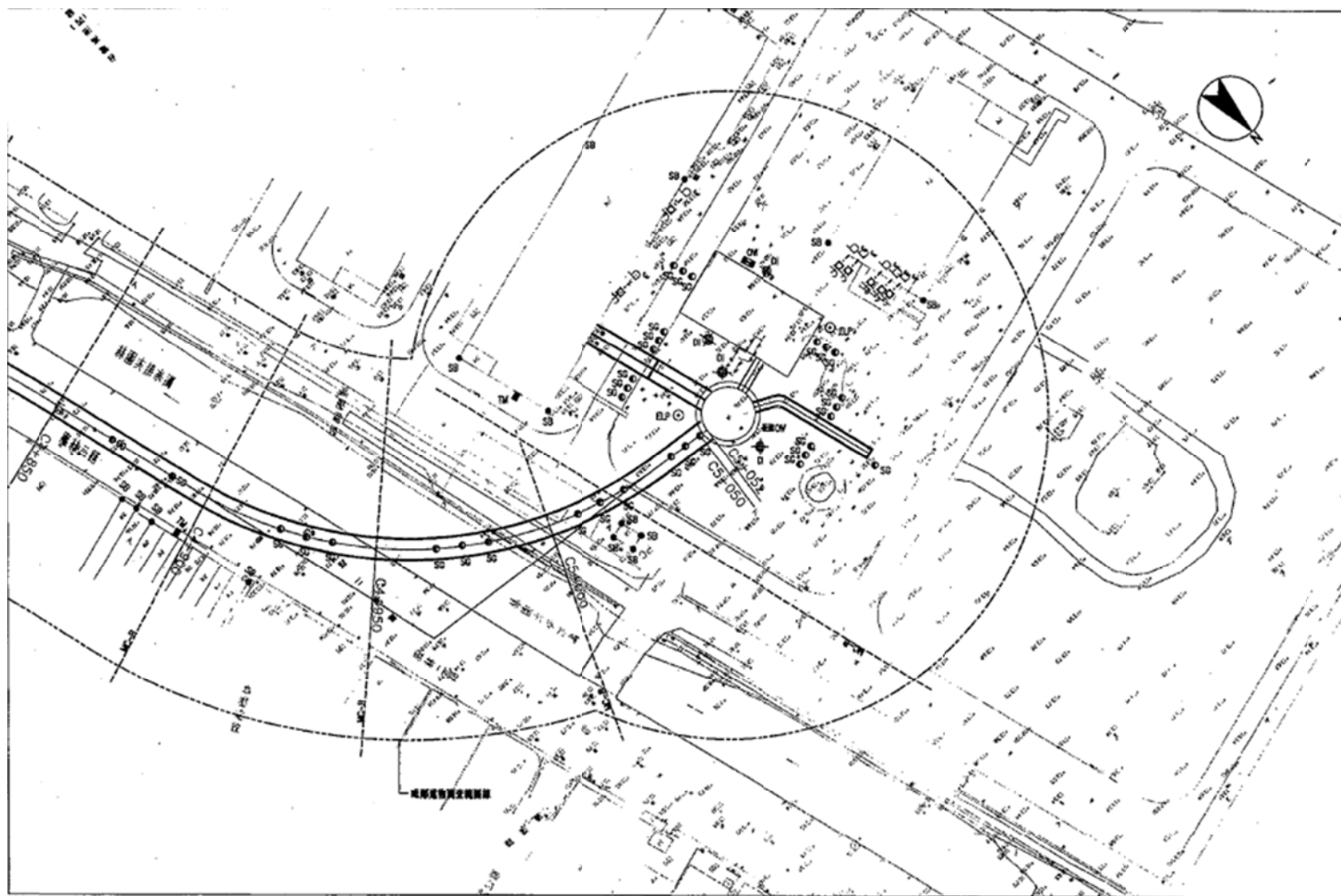
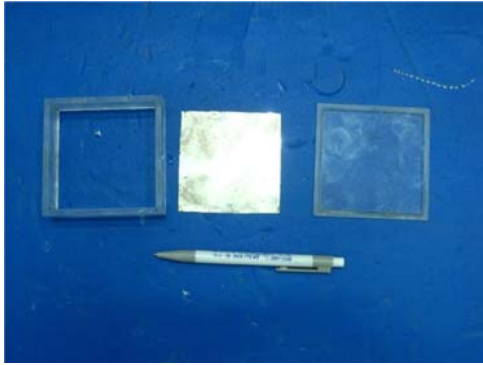
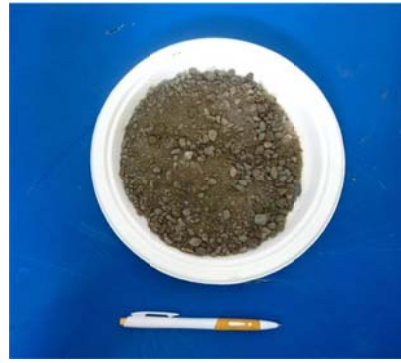


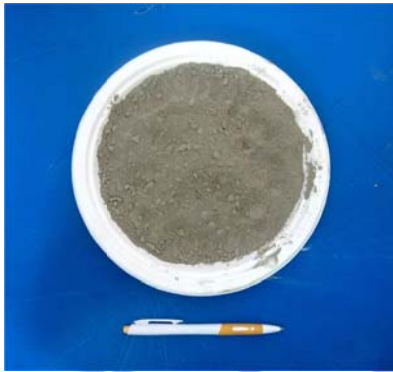
圖 4-28 沉箱監測範圍



(a) 混凝土用模具



(b) 混凝土用砂



(c) 混凝土用水泥



(d) 水泥與砂加水拌合



(e) 混凝土試體完成

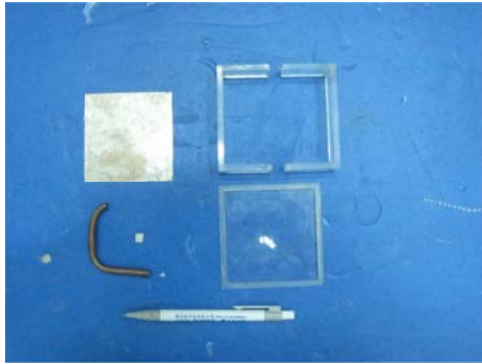
圖 5-1 直剪混凝土製作



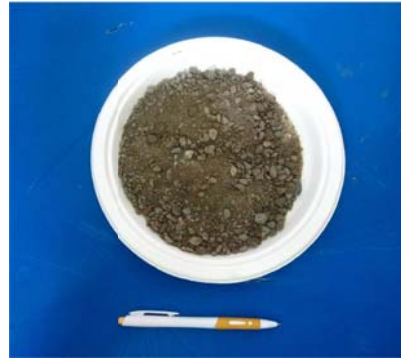
圖 5-2 附外徑 3mm 銅質噴氣管及噴氣口之混凝土下盒試體



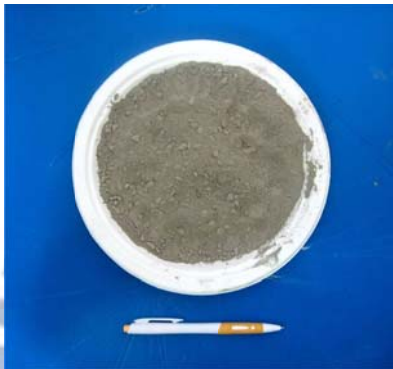
圖 5-3 模擬噴氣工法直剪試驗混凝土下盒之製作模具



(a) 混凝土試體之模具



(b) 混凝土用砂



(c) 混凝土用水泥



(d) 水泥與砂加水拌合



(e) 噴氣混凝土下盒
試體完成

圖 5-4 直剪試驗噴氣混凝土下盒之製作



(a) 直剪盒上盒、NF
膜、與強力雙面膠

(b) 將 NF 膜包覆於直
剪盒上盒底部

圖 5-5 直剪盒上盒與鑽孔 NF 膜

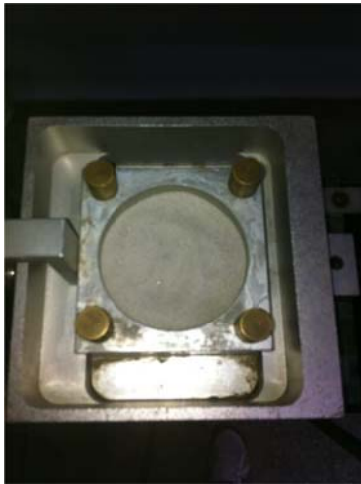


(a) 空壓機

(b) 第一次調壓

(c) 第二次調壓

圖 5-6 空氣噴流之氣壓馬達設備



(a) 剪力盒內備製砂土試體



(b) 蓋上透水石及上蓋板



(c) 安裝加壓載具



(d) 安裝測微計及加載垂直荷重



(e) 以螺柱將上下剪力盒頂開後，開始直剪試驗

圖 5-7 一般直剪試驗步驟



(a) 置入有埋設噴氣孔之混凝土



(b) 蓋上下附 NF 膜之上盒及備製盒內之渥太華砂試體



(c) 蓋上透水石及上蓋板



(d) 放置垂直荷重加壓載具、水平及垂直位移計並接上空氣噴流管



(e) 調整噴流孔之空氣壓力



(f) 以螺柱將上下盒頂開後，開始直剪試驗

圖 5-8 噴流直剪試驗步驟

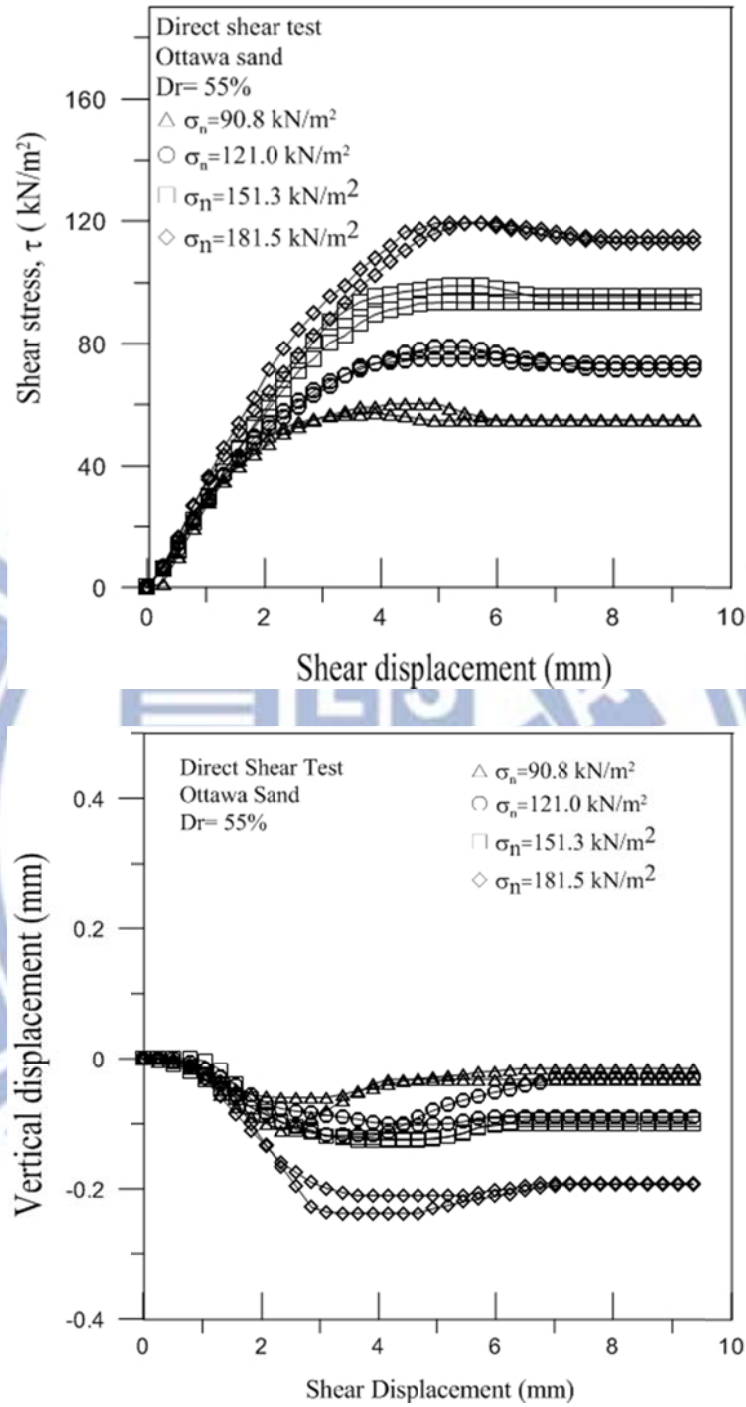


圖 5-9 中等緊密渥太華砂剪應力及體積應變隨剪位移之變化

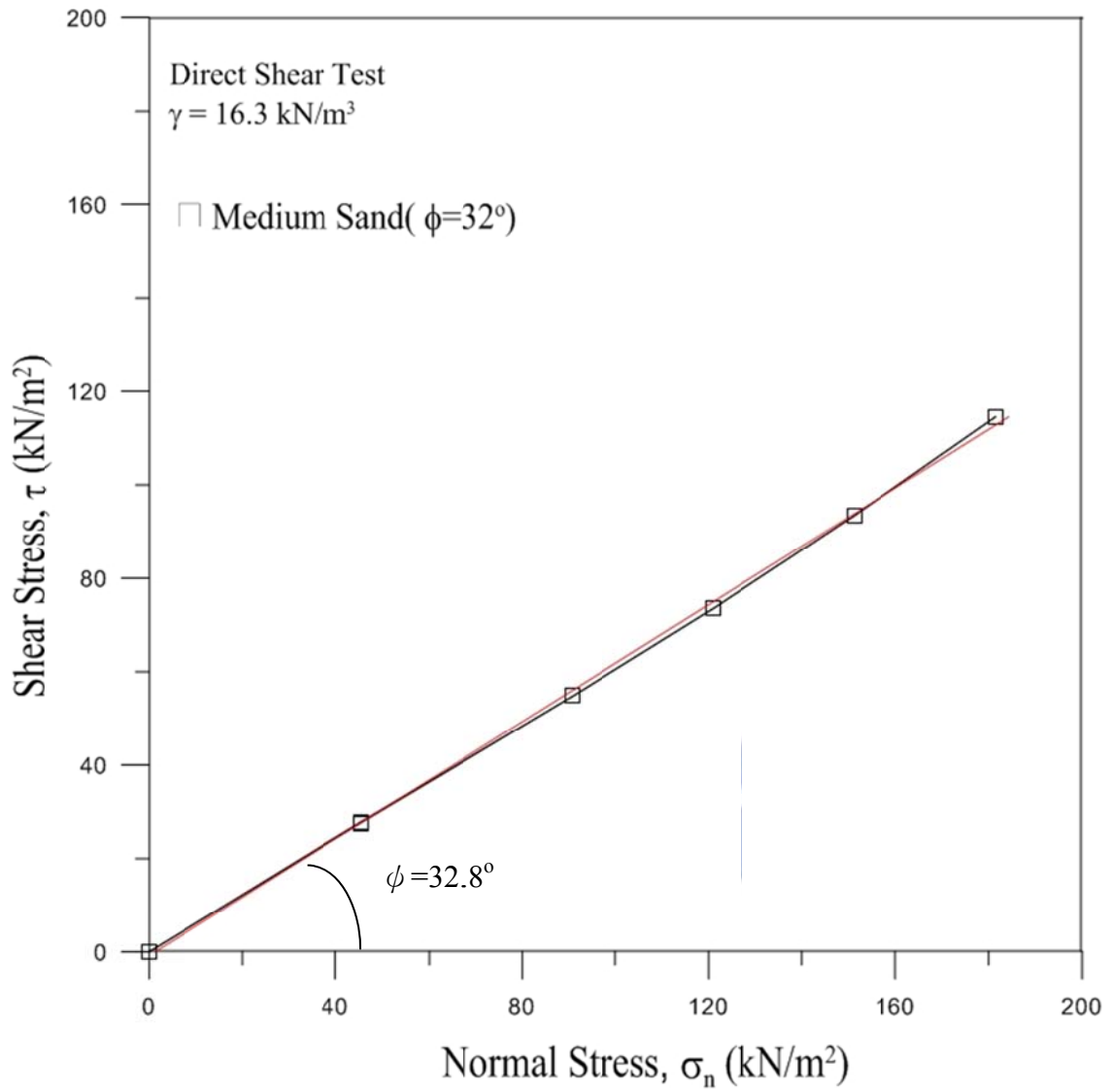


圖 5-10 中等緊密渥太華砂之破壞包絡線

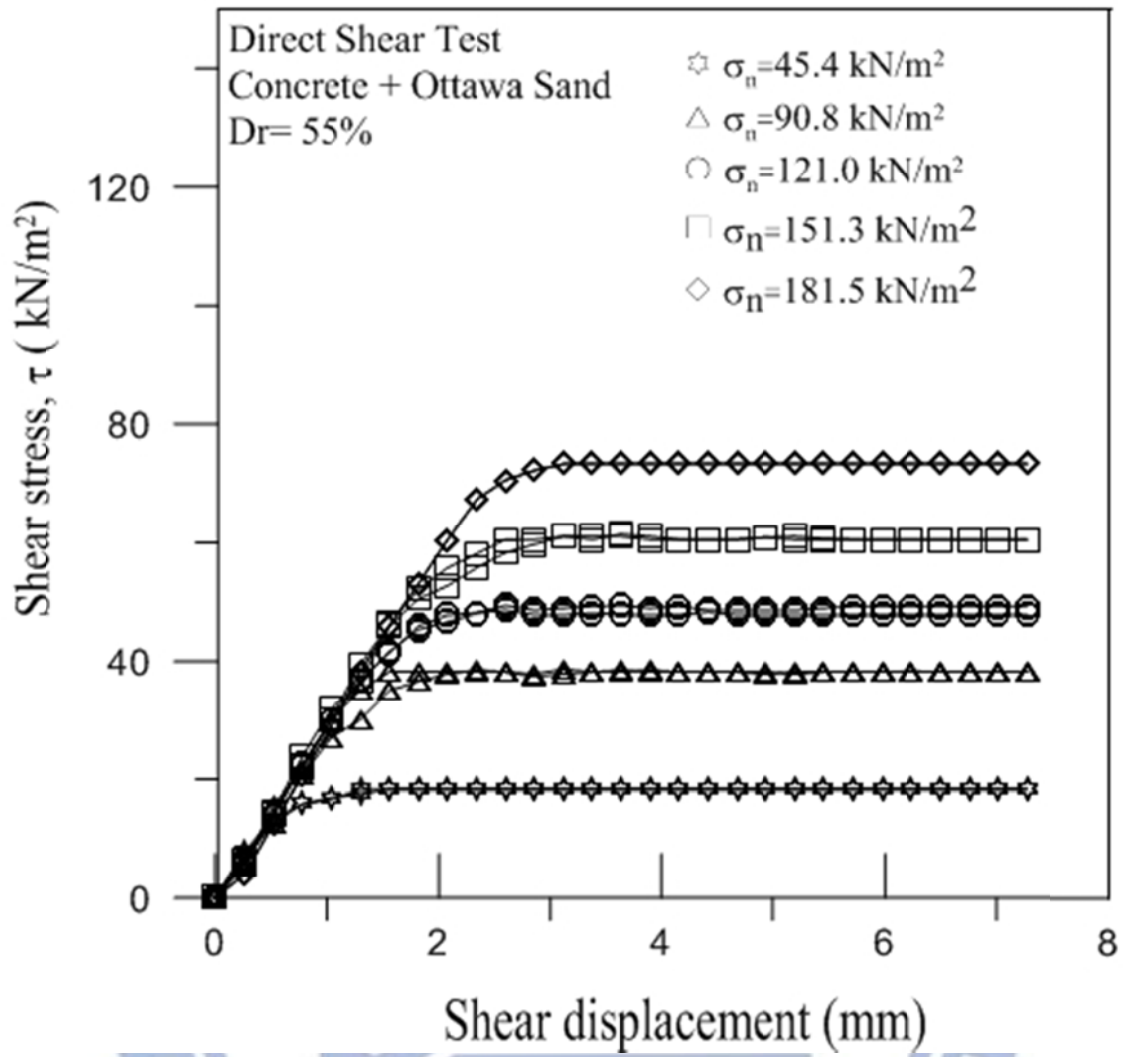


圖 5-11 平滑混凝土與渥太華砂界面之剪應力隨剪位移變化

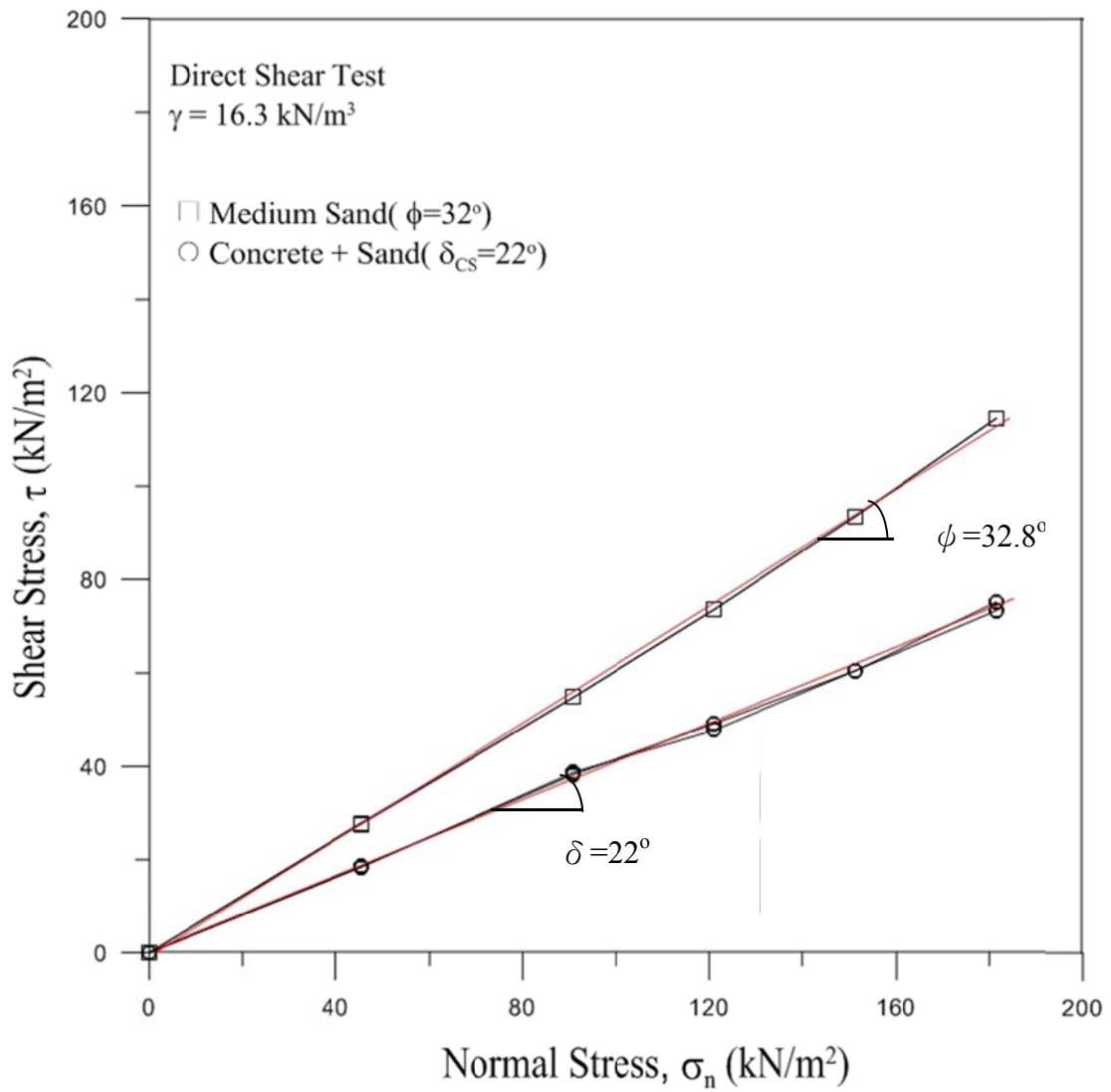


圖 5-12 平滑混凝土與渥太華砂界面隨剪位移之變化

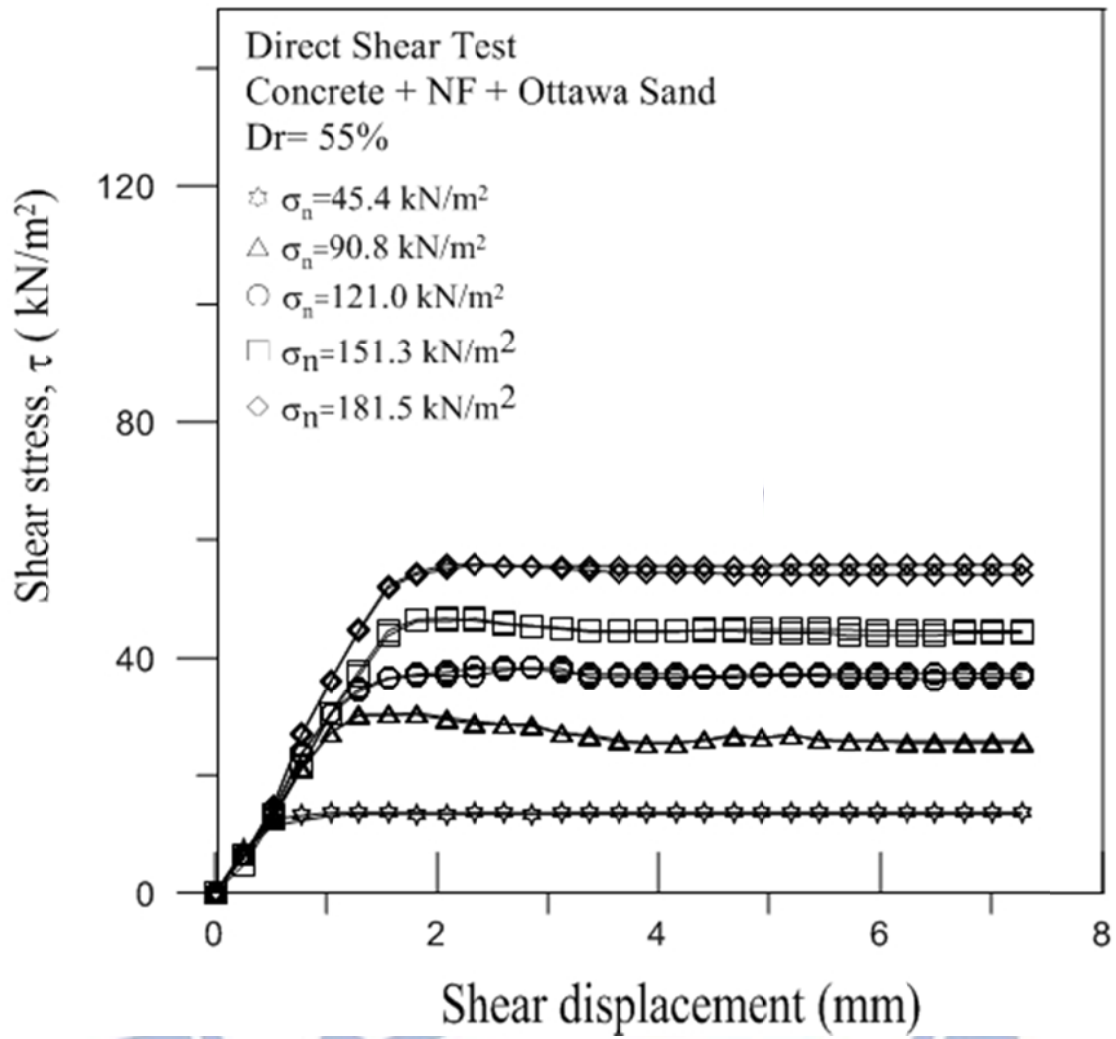


圖 5-13 混凝土對包覆 NF 膜上盒之剪位移對剪應力

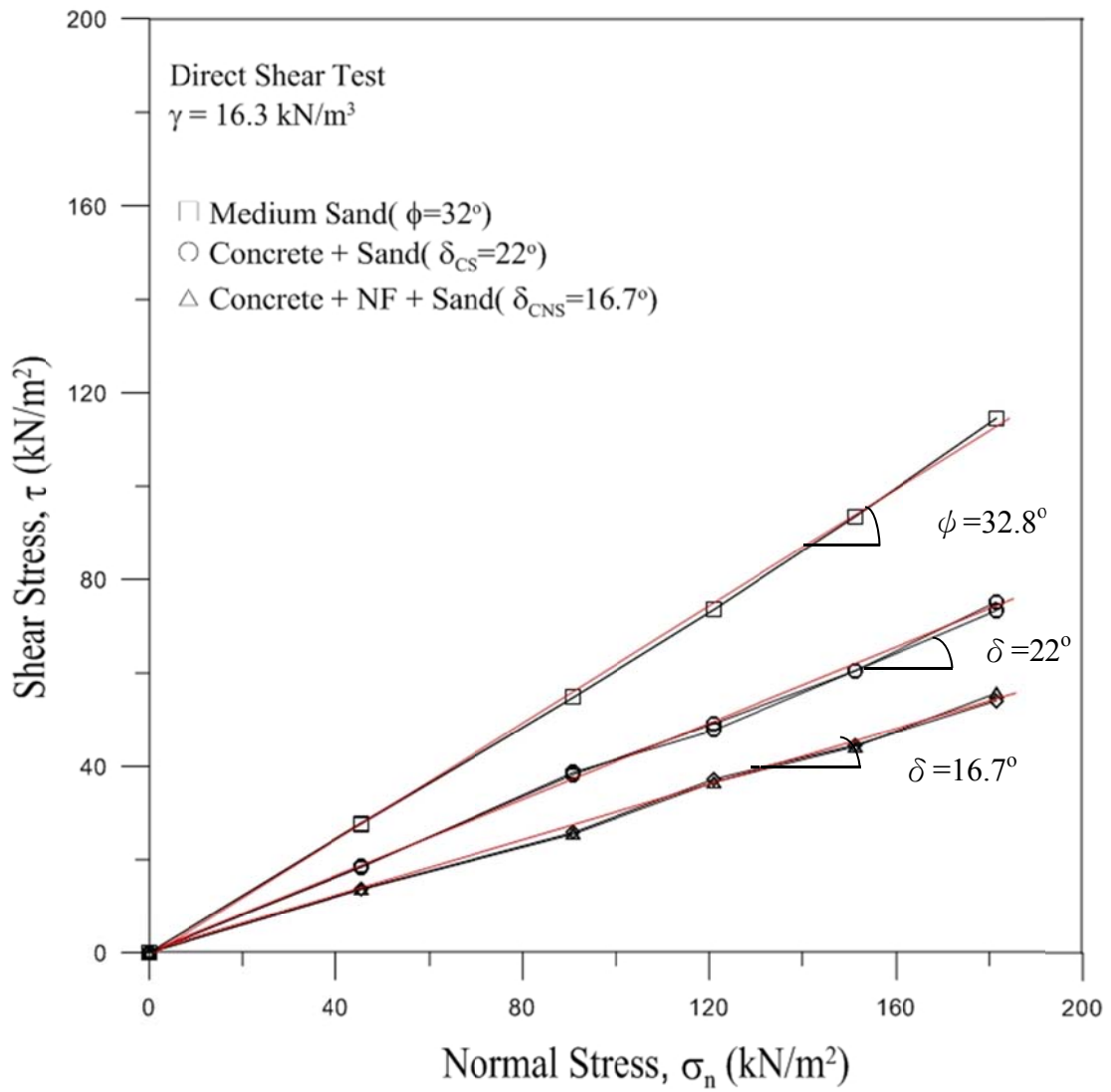


圖 5-14 混凝土對包覆 NF 膜上盒之正向應力對剪應力

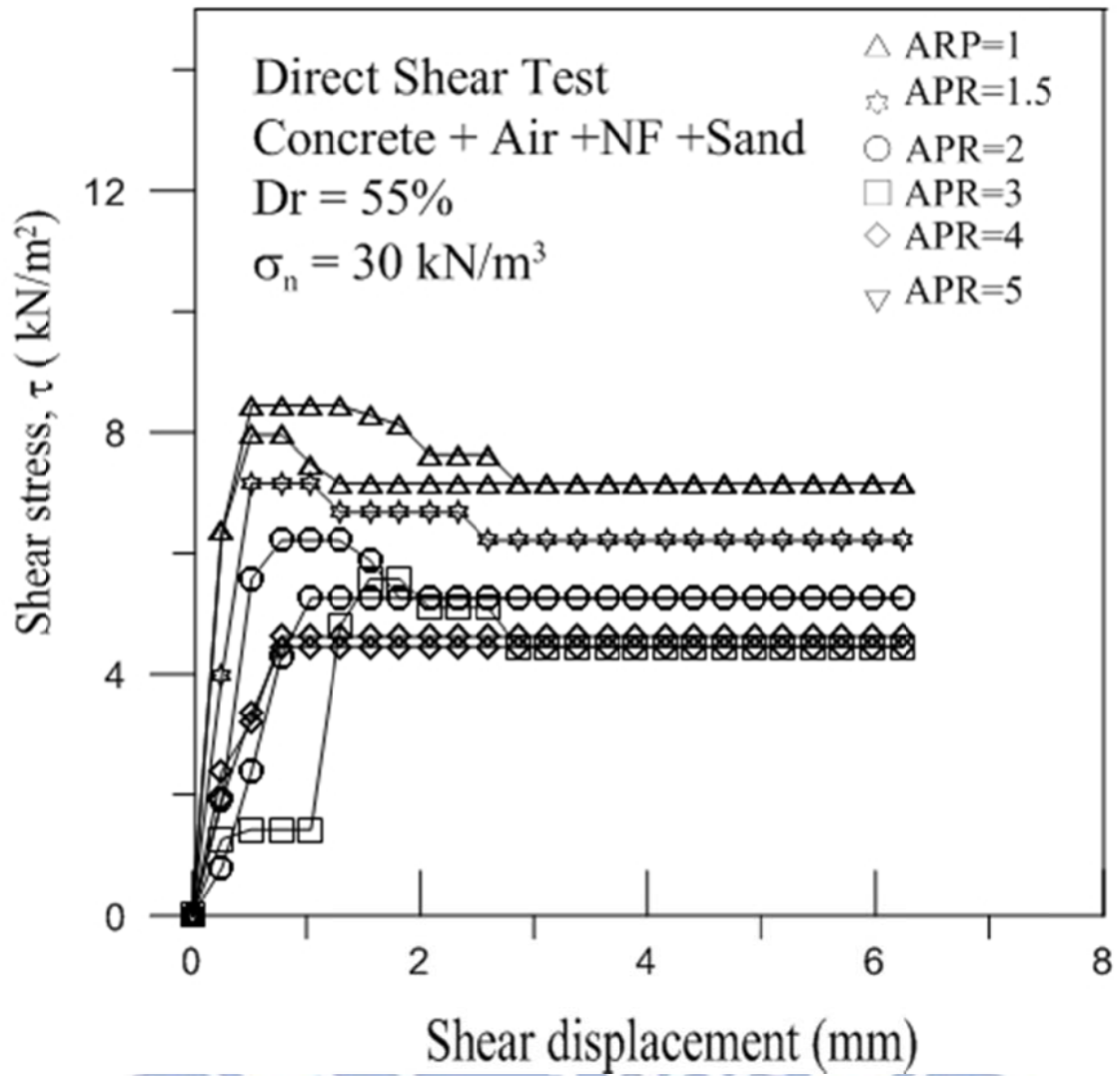


圖 5-15 在 30 kN/m^2 對應 APR 為 1、1.5、2、3、4、5 之剪應力對剪應變

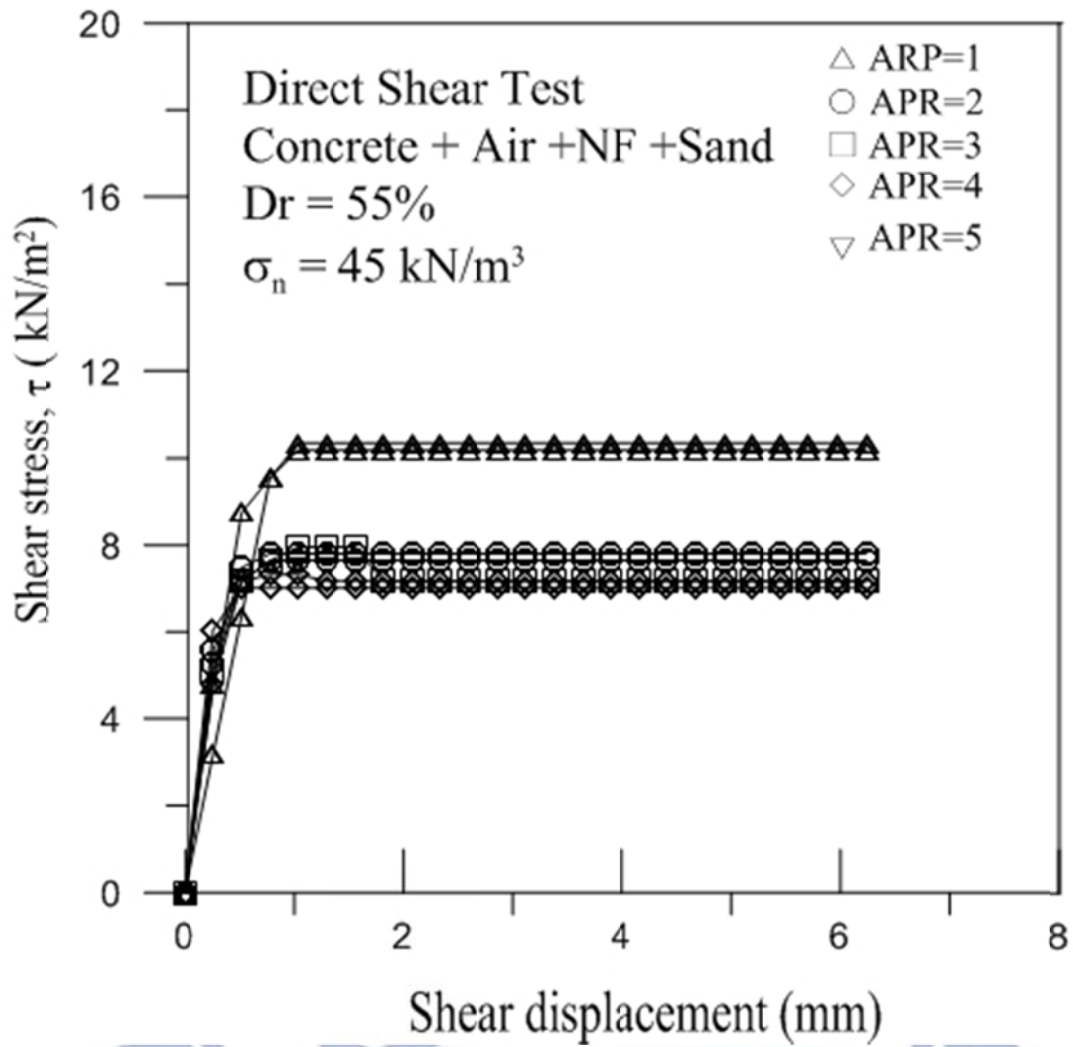


圖 5-16 在 45 kN/m^2 對應 APR 為 1、2、3 之剪應力對剪應變

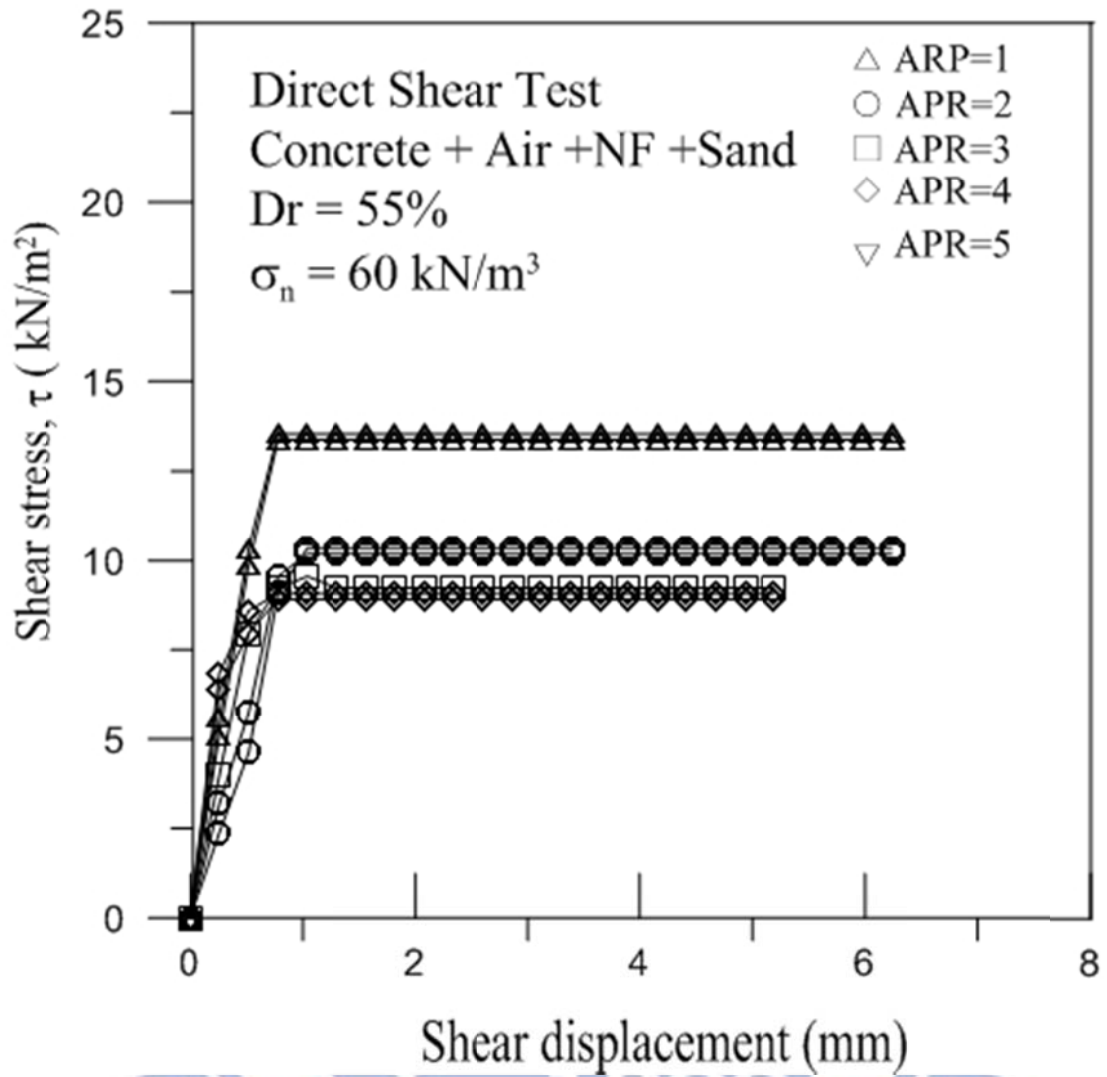


圖 5-17 在 60kN/m^2 對應 APR 為 1、2 之剪應力對剪應變

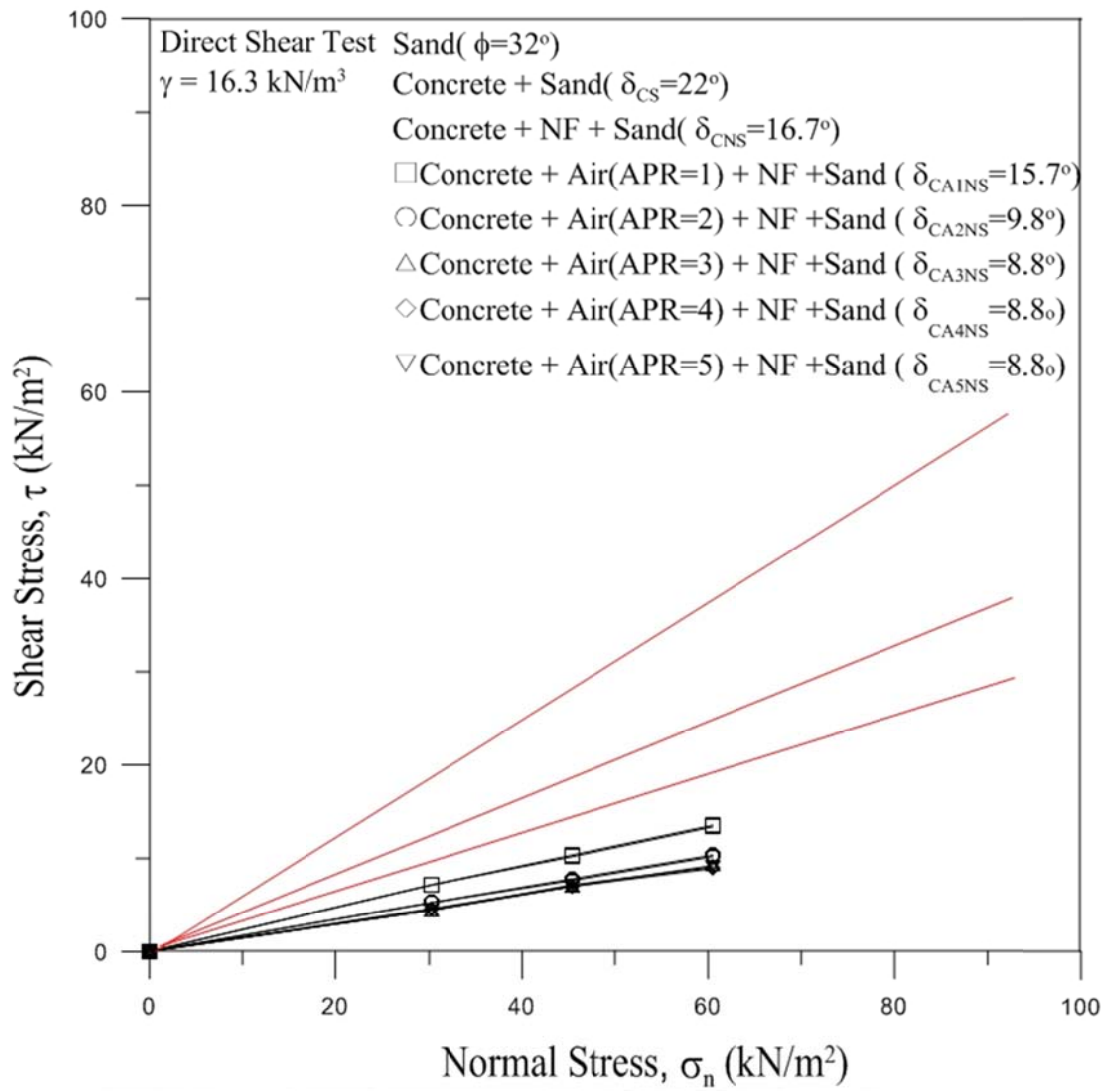


圖 5-18 不同噴氣壓力下混凝土與包覆 NF 膜之上盒剪應力對正應力

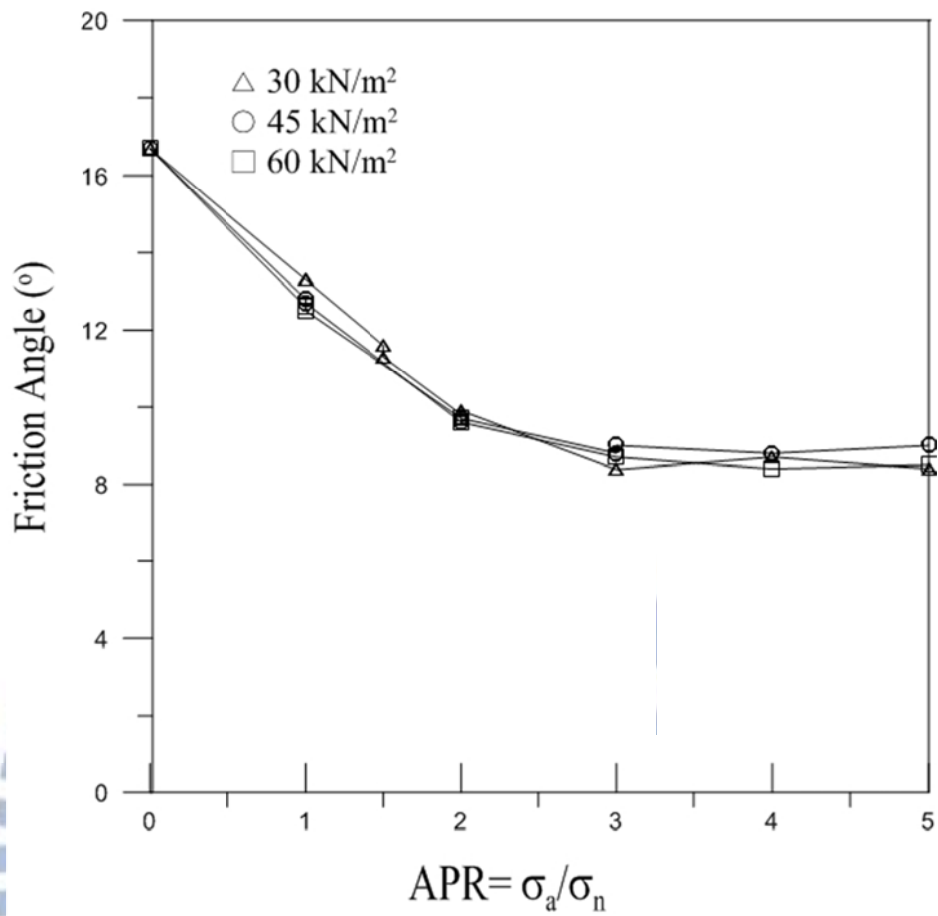


圖 5-19 界面摩擦角隨氣壓之變化

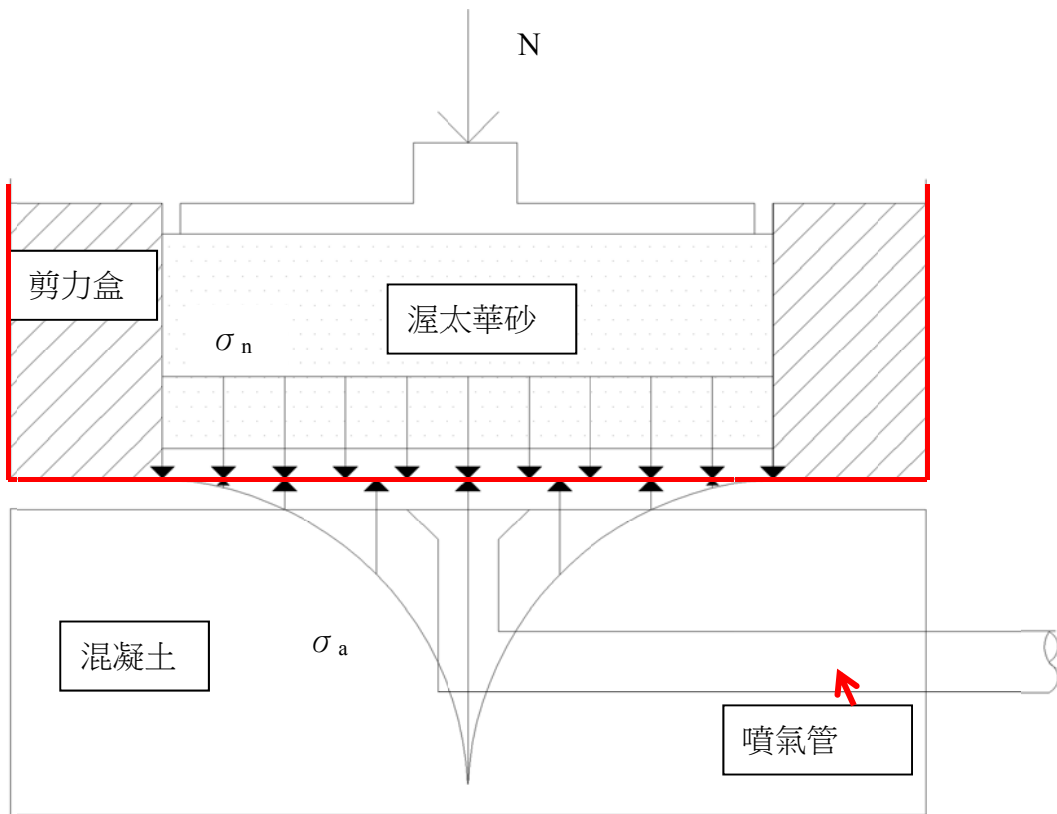


圖 5-20 空氣壓力分布示意圖

