

國立交通大學

工學院工程技術與管理學程

碩士論文

以有限元素法評估硬式透水鋪面(JW工法)之結構承載力

Finite element method to assess carrying capacity of the structure of hard permeable pavement (JW Method)

The logo of National Central University (NCU) is a circular emblem. It features a gear-like outer border. Inside the circle, there is a stylized representation of a traditional Chinese building or structure. At the bottom of the emblem, the year '1896' is prominently displayed in a white box with a blue background.

1896

研究生：李忠文

指導教授：曾仁杰教授

中華民國一百零三年七月

以有限元素法評估硬式透水鋪面(JW 工法)之結構承載力

Finite element method to assess carrying capacity of the structure of hard permeable pavement (JW Method)

研 究 生：李忠文

Student：Chung-Wen Lee

指 導 教 授：曾仁杰 博士

Advisor：Dr. Ren-Jye Dzeng

國 立 交 通 大 學

工學院工程技術與管理學程

碩 士 論 文

A Thesis

Submitted to Degree Program of Engineering Technology and Management

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

in

Engineering Technology and Management

July 2014

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零三年七月

以有限元素法評估硬式透水鋪面(JW 工法)之結構承載力

研究生：李忠文

指導教授：曾仁杰博士

國立交通大學工學院營建技術與管理學程

摘要

一般進行鋪面沉陷分析時，承載力之作用多以軸對稱方式將其簡化成二維的問題，以減少計算的複雜性。然而鋪面結構承載卻是三維的行為，因此建立一個三維的有限元素鋪面模型，可以適切地表達真實鋪面的情況。

本研究主要探討各式卡車及一般轎車之荷重對不同條件鋪面作用產生之影響，分析採用 10cm、15cm、20cm 及 25cm 之 JW 混凝土鋪面厚度與 10cm、20cm、30cm、40cm 及 50cm 碎石級配，並分別與路基為砂石、黏土及軟弱黏土層進行交叉分析其結構穩定。以採用有限元素法程式 Plaxis3D 進行分析，瞭解鋪面結構之在車輛載重下之力學行為。

分析結果顯示在 JW 混凝土鋪面 25cm 搭配碎石厚度 10cm 條下足以承受各式車輛行駛，貯水容量則可依需求增加其厚度。

關鍵字：承載力、透水鋪面、貯水

Finite element method to assess carrying capacity of the structure of hard permeable pavement (JW Method)

Student : Chung-Wen Lee

Advisor : Dr. Ren-Jye Dzung

Master Degree Program of Construction Technology and Management
College of Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Generally, the pavement subsidence analysis usually adopts two-dimensional axial symmetric simulation to simplify the approach. However, the behavior of the load bearing on pavement structure is a three-dimensional problem. A three-dimensional finite element model is more proper to express the real conditions.

This study focuses on the analysis of the response reduced by trucks and cars in general. A series arrangement of JW concrete pavement thickness by 10cm, 15cm, 20cm and 25cm with gravel grading by 10cm, 20cm, 30cm, 40cm and 50cm, respectively, under the ground surface for were simulated. The foundation, soft clay, normal clay, and sand were considerate as well. The computer program Plaxis3D was using to evaluate behavior of the pavement structure under the vehicle load applied.

The result shows that a set of 25 cm thick JW concrete pavements with 10cm thick gravel above a sandy foundation can well take the loads by all kinds of vehicles. Additionally, the water storage capacity may increase by its thickness on demand.

Key words: Carrying Capacity, Pervious Pavement, and Water Storage

誌謝

從民國 71 年畢業至今參加各種證照考試，未曾想在上學校在做學習，於 99 年在偶然的機遇及同學慫恿下在無意中考進入交通大學研究所攻讀碩士，圓了一個上研究所願望。

在論文寫作需感謝曾老師，中華大學的余文德老師、王維志老師在初審時的指導；於畢業承蒙陸軍官校王世旭及宜蘭大學土木系主任李欣運老師口試審查指導；並感謝前環興科技股份有限公司周南山董事督促下、在論文研討與工作上，都給我極大的幫助與指導；還有品岱公司陳瑞文董事長的協助及提供 PLAXIS 3D 程式，及淡江大學李英豪老師、宜蘭大學趙紹錚老師、台科大楊國鑫老師指導討論、及郭治平博士與台科大大地組陳毅修同學協助下，在此也一併表示感謝。

另外我還要感謝一路伴我走來的老婆月娥，在我學習及論文寫作上，無怨無悔支持，及以我為學習態度對女兒學業的督促及教導。願我的學習能帶給寶貝女兒亦筑、亦涵及亦婷作為後續的榜樣。

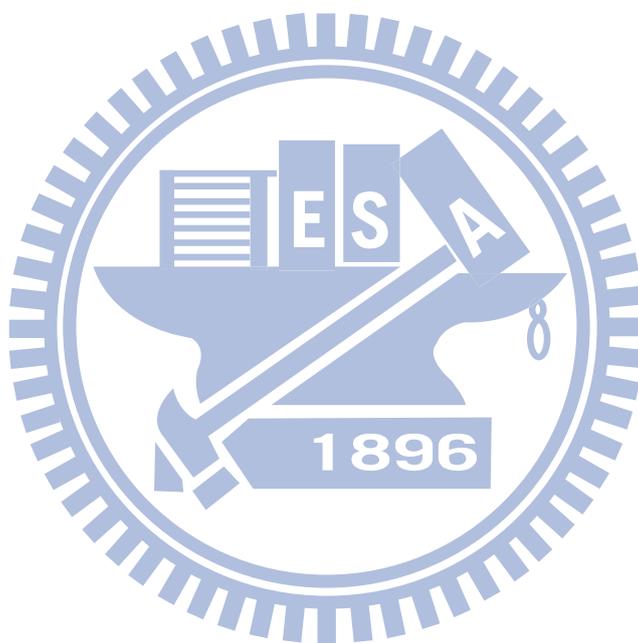
忠文 2014/7/20

目 錄

	頁 次
摘要.....	I
誌謝.....	III
目 錄.....	IV
表目錄.....	VII
圖目錄.....	X
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究內容.....	3
1.4 研究方法.....	3
第二章 文獻回顧.....	6
2.1 透水鋪面型式.....	6
2.2 台灣營建研究院試驗測試報告.....	7
2.3 輪胎對路面所造成的應力.....	8
2.4 土壤之彈性模數.....	11
2.5 材料之強度包絡線.....	15
2.5.1 強度包絡線與破壞包絡線.....	15
2.5.2 土壤的剪力強度及破壞準則.....	16
2.6 剛性混凝土鋪面破壞模式.....	20
2.6.1 剛性鋪面破損原因.....	20
2.6.2 剛性鋪面破損種類.....	22
2.7 PCASE 程式之驗證.....	26
第三章 研究方法.....	27
3.1 PLAXIS 有限元素法軟體.....	27
3.2 分析參數.....	31

3.2.1	土壤參數	31
3.2.2	地下水壓分佈	32
3.2.3	結構元件參數	32
3.2.4	路面厚度	33
3.2.5	土層材料參數	35
3.2.6	雙輪載重設定	36
3.3	PLAXIS 3D 成果判讀	38
3.4	影響係數法	39
3.5	總沉陷量	43
3.6	土壤密度	43
第四章	結果與討論	46
4.1	參數建立	46
4.1.1	道路車輛載重模型之建立	46
4.1.2	選定材料模式	46
4.1.3	設定邊界條件	49
4.2	模擬成果判讀	50
4.2.1	沉陷量成果判讀	50
4.2.2	壓力及張力成果判讀	59
4.2.3	剪力成果判讀	62
4.3	結構承载力討論	69
4.3.1	有效應力承载力探討	69
4.3.2	各種車輛承载力	69
4.3.3	Pcase 驗證	72
4.3.4	混凝土強度探討	72
第五章	結論與建議	75
5.1	承载力有限元素相關分析	75
5.2	有限元素分析研究結果	76

5.3 後續研究建議.....	76
參考文獻.....	77
附錄.....	81
一、Plaxis 2d 分析.....	81
二、Plaxis 成果判讀全車段面資料分析.....	88
三、口試委員意見.....	100



表目錄

頁次

表 2.1 單軸雙輪載重下胎印等效面積之長度值 (cm) (馮天正, 2000)	10
表 2.2 雙軸雙輪載重下胎印等效面積之長度值 (cm) (馮天正, 2000)	11
表 2.3 估計 ES 的經驗式(摘自 Bowles, 1982)	12
表 2.4 各種土壤 ES 的範圍(摘自 Bowles, 1982)	13
表 2.5 黏土之彈性模數 ES 經驗公式(摘自李維峰等, 2003)	13
表 2.6 砂土之彈性模數 ES 經驗公式(摘自李維峰等, 2003)	14
表 2.7 粒狀土壤楊氏模量(摘自 Geotechdata.info, 2012)	14
表 2.8 凝聚力性土壤之彈性模數(摘自 Geotechdata.info, 2012)	14
表 2.6.1 一般剛性鋪面常見的破壞模式與肇因(陳治中, 2001)	23
表 2.6.2 一般剛性鋪面破損等級(陳治中, 2001)	25
表 3.2.1 JW 鋪面土壤參數設定	35
表 3.5.1 手算分析結果	43
表 3.5.2 數值分析結果	43
表 4.1 成果判讀軟弱黏土模擬 9 公尺*14 公尺*5 公尺瞬間沉陷量	51
表 4.2 成果判讀中等強度黏土模擬 9 公尺*14 公尺*5 公尺瞬間沉陷量	52
表 4.3 成果判讀中等強度黏土模擬 9 公尺*14 公尺*5 公尺瞬間沉陷量	53
表 4.4.1 擬軟弱黏土(Soft Clay)	59
表 4.4.2 中等強度黏土(Soft Clay)Y 向壓力及張力	60
表 4.4.3 一般砂土(Sand)Y 向壓力及張力	60
表 4.5.1 軟弱黏土(Soft Clay) (側向力 XY 向)剪力	63
表 4.5.1 中等強度黏土(Medium clay) (側向力 XY 向)剪力	64

表 4.5.1 一般砂土(Sand) (側向力 XY 向)剪力.....	64
表 4.6.1 42T 級 20T 車輛承受側向力(XY 方向)	70
表 4.6.1 15T 及 2T 車輛承受側向力(XY 方向).....	71
表 4.7.1 PCASE 15T 及 20T 車輛設計厚度數據	73
表 4.7.2 PCASE 36T 設計厚度數據.....	74
附表 1.2 JW=25cm 碎石=50cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	81
附表 1.2 JW=25cm 碎石=40cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	81
附表 1.3 JW=25cm 碎石=30cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	82
附表 1.4 JW=25cm 碎石=20cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	82
附表 1.5 JW=25cm 碎石=10cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	82
附表 1.6 JW=20cm 碎石=50cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	83
附表 1.7 JW=20cm 碎石=40cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	83
附表 1.8 JW=20cm 碎石=30cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	83
附表 1.9 JW=20cm 碎石=20cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	84
附表 1.10 JW=20cm 碎石=10cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	84

附表 1.11 JW=15cm 碎石=50cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	84
附表 1.12 JW=15cm 碎石=40cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷 單位(cm)	85
附表 1.13 JW=15cm 碎石=30cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	85
附表 1.14 JW=15cm 碎石=20cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	85
附表 1.15 JW=15cm 碎石=10cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	86
附表 1.16 JW=10cm 碎石=50cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	86
附表 1.18 JW=10cm 碎石=30cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	87
附表 1.19 JW=10cm 碎石=20cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	87
附表 1.20 JW=10cm 碎石=10cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)	87
附表 2.2 JW 及碎石各層與中等強度黏土間各層瞬間沉陷量(mm)	89
附表 2.3 JW 及碎石各層與一般砂土間各層瞬間沉陷量(mm)	90
附表 2.4 JW 及碎石各層與軟弱黏土間各層應變量	91
附表 2.5 JW 及碎石各層與中等強度黏土間各層應變量	92
附表 2.6 JW 及碎石各層與一般砂土間各層各層應變量	93
附表 3 論文口試審查意見回覆表.....	100

圖目錄

頁次

圖 1.1 JW 工法透水性鋪面完成照	2
圖 1.2 研究流程.....	5
圖 2.1 透水鋪面之保水、半保水與排水特性示意圖.....	7
圖 2.2 JW 塑膠架構結構強度(H=15cm)測試相片.....	8
圖 2.3 雙軸雙輪配置圖.....	9
圖 2.4 接觸胎印之尺寸.....	9
圖 2.4 材料之強度包絡線.....	15
圖 2.5 庫倫剪力強度破壞準則.....	16
圖 2.6 莫爾庫倫破壞準則.....	17
圖 2.7 土壤極限平衡之應力莫爾圓及破壞面示意圖.....	17
圖 2.8 σ_3 與 σ_1 座標之破壞包絡線.....	19
圖 3.1 E0 和 E50 的定義.....	29
圖 3.2 應力圓：其中一個和 Coulomb 包線相切.....	31
圖 3.3 重車輪胎配置圖.....	37
圖 3.4 模擬平、斷面示意圖.....	38
圖 3.5.1 應力增量的相對關係.....	39
圖 3.5.2 Determination of stress below the corner of a flexible rectangular loading area (Das textbook).....	40
圖 3.5.3 雙軸雙輪載重分佈圖.....	41
圖 3.5.2 雙軸雙輪載重 1/4 分佈圖.....	41
圖 3.6 標準普羅克達試驗.....	44

圖 4.1 道路車輛載重模型.....	46
圖 4.2 各層材料組成厚度.....	47
圖 4.3 實驗室 210kgf/cm ² 混凝土單壓試驗.....	47
圖 4.4 Plaxis 210kgf/cm ² 混凝土單壓試驗.....	48
圖 4.5 軟弱黏土壓密(排水)試驗.....	48
圖 4.6 全車考量沉陷量.....	49
圖 4.7 後軸單邊雙軸雙輪.....	50
圖 4.8 JW25G50 軟弱黏土之瞬間沉陷量.....	54
圖 4.9 各層沉陷量.....	55
圖 4.10.1 JW 與碎石搭配軟弱黏土層之沉陷量.....	55
圖 4.10.2 JW 與碎石搭配中等強度黏土之沉陷量.....	56
圖 4.10.3 JW 與碎石搭配砂土層之沉陷量.....	56
圖 4.11 JW25 Soft clay 各層沉陷量趨勢圖.....	57
圖 4.12 JW25G50 Soft clay 沉陷量圖.....	58
圖 4.13 JW25G50 Soft clay Y 向沉陷量圖.....	58
圖 4.14.1 軟弱黏土(Soft Clay)Y 向張力圖.....	61
圖 4.14.2 中等強度黏土(Soft Clay)Y 向張力圖.....	61
圖 4.14.3 一般砂土(Sand)Y 向張力圖.....	61
圖 4.15 軟弱黏土(Soft Clay)Y 向壓力及張力圖.....	62
圖 4.16 一般砂土(Sand) (側向力 XY 向)剪力圖.....	65
圖 4.17 剪力圖.....	65
圖 4.18-1 軟弱黏土(Soft Clay)張力及壓力圖.....	66
圖 4.18-2 中等強度黏土(Medium clay) (側向力 XY 向)張力及壓力圖.....	67

圖 4.18-3 一般砂土(Sand) (側向力 XY 向)張力及壓力圖	68
附圖 2.1 軟弱黏土之瞬間總沉陷量	94
附圖 2.2 中等強度黏土之瞬間總沉陷量	94
附圖 2.3 一般砂土之瞬間總沉陷量	94
附圖 2.4 JW25G50 在軟弱黏土層情況之沉陷分佈(最大總沉陷量 2.71mm)	95
附圖 2.5 JW25G50 在軟弱黏土層之 JW 層及碎石層介面沉陷(最大 2.652mm)	95
附圖 2.6 JW25G50 在軟弱黏土層之碎石層及土壤層介面沉陷(最大 2.499 mm)	95
附圖 2.7 JW25G50 最大沉陷點圖	96
附圖 2.8 JW25G50 垂直向沉陷分佈圖	97
附圖 2.9 JW25G50 應力網格分佈圖	98
附圖 2.10 JW25G50 應變分佈圖	99

第一章 緒論

1.1 研究動機

全球氣候變遷持續，破記錄之豪雨與熱浪不斷發生，台灣淹水問題不斷擴大。其中，“外水”或可仰賴河川，而“內水”則需靠滯洪設施。奈何，台灣都會區之滯洪空間有限，利用公路或人行道之鋪面透水儲水，乃成為經濟有效的滯洪方式。

透水鋪面(Permeable Pavement)在目前已經日益受到重視，在環保意識高漲的今天，世界各國無不朝向綠色建築的目標努力，而其中保水性更是一項重要的指標。透水性鋪面能使降雨由地表吸收，減少排水系統的負荷，並補充地下水，對減低下水道之需求，有很大的幫助。

長期以來，許多不同的高承載或高透水性鋪面工程技術，都被測試過。但是，一般而言能夠高承載的道路不能透水，能夠高透水的鋪面不能高承載，且多無法永續。

混凝土，形成的「結構性透水鋪面」。JW 工法透水鋪面乃強調在人工鋪面之下鋪設相當厚度的碎石，期以儲水與讓水活化土壤；而在碎石之上，則鋪設混凝土鋪面，但是採用具備有結構性、導水性的塑膠架構，取代傳統的鋼筋，強化此混凝土鋪面的抗壓強度與抗彎拉強度(陳瑞文,2006)。其 JW 透水性鋪面表面約每平方米就有一百個孔洞，提供雨水與空 JW 工法透水鋪面既不屬於材料性透水，亦不屬於拼接性透水，而是運用「空調導水管架構」結合一般不透水氣流通。

JW 工法透水鋪面是以硬式鋪面(混凝土)內裝置垂直透水管方式(如圖 1.1)，將雨水儲存於鋪面下方之碎石層內。其所蓄存的雨水，經碎石與地下生態系統過濾後，可再加以利用。此工法兼具承載、透水、透氣、蓄水、排水、降溫、減碳、生態多樣性等多項功能。



圖 1.1 JW 工法透水性鋪面完成照

JW 工法係為發明人陳瑞文(Chen Jui-Wen)之名字縮寫，JW 工法雖屬專利產品，但發明人陳瑞文表示可免費授權台灣各公家機關使用其專利權。而行政院內政部建築研究所，最近一版綠建築評估規範中有明確推薦本工法，即是出現於「2012 年版之綠建築評估手冊－基本型」一書中，第 39 頁內，特別提出之「高承載力的通氣管結構型透水鋪面」。該手冊僅強調此特殊鋪面對於基地保水的效益，可以達到市售透水磚的六倍。但其實該鋪面的效益乃遠大於此，此乃本研究所將期望確認者。

1.2 研究目的

欲了解在不同載重下之土壤路基(subgrade)情況下，之結構承載力分析，及探討在特定土壤及碎石級配厚度下，最經濟之 JW 工法透水鋪面厚度。

1.3 研究內容

透水鋪面 (Permeable Pavement)在目前已經日益受到重視，長期以來，許多不同的高承載或高透水性鋪面工程技術，都被測試過。但是，經常能夠高承載的道路不能透水，能夠高透水的鋪面不能高承載，且多無法永續。

採有限元素法研究在不同車輛或行人載重及不同路基土壤 (subgrade)情況下，級配層、鋪面層與土壤彼此之互制行為，包括應力應變及變形分析。並透過有限元素法之參數分析，提供人行道及公路在不同載重下，一套最佳鋪面厚度(包括級配層及鋪面層)設計組合。

擬以各式卡車及一般轎車之假設荷重，採用 10cm、15cm、20cm 及 25cm 之 JW 工法透水鋪面混凝土厚度與 10cm、20cm、30cm、40cm 及 50cm 碎石級配，並分別假設路基為砂石、黏土及軟弱黏土層進行交叉分析其結構穩定。採用有限元素法程式 Plaxis3D 進行分析，以瞭解鋪面結構之在車輛載重下之力學行為(例如：變形、應變、張力、壓力、剪力、彎矩等分佈情況)。

1.4 研究方法

本研究分成數個步驟進行，其流程依下列圖 1.2，包括對硬式透水鋪面設計之相關資料蒐集、建立 PLAXIS 鋪面模型、驗證所建立之鋪面模型、對鋪面模型進行相關分析、建立非線性鋪面模型、以及對非線性鋪面模型進行相關分析。

1. 收集資料：收集混凝土、碎石及各種土壤之參數資料(如.楊氏模量(Young's modulus) E 和泊松比(Poisson's ratio) ν ，內聚力 c (Cohesion)和摩擦角 ϕ (Friction angle)，以及剪脹角 φ (Dilatancy angle) E 值及試驗資料(如混凝土單壓試驗及土壤壓密試驗)。
2. 建立幾何模型：以三維空間元素(區塊)模擬地層及實體載重，版元素(Plate Element)模擬 JW 工法之透水鋪面。

3. 設定元素屬性:依據收集資料,設定各層元素之屬性與參數資料,依模擬之條件選定組成率模型,設定其排水狀況。
4. 建立邊界條件:依幾何模型設定邊界,將邊界條件設定為固定式後、使其自動產生有限元素格網,且將網格全部採用細網格型式,使其計算精度更為準確。(註:Plaxis 提供最粗、粗、細及極細網格四種形式,因細及極細計算結果差距甚微,因此本研究採細網格形式處理。)
5. 輸入各層材料及初始條件:建立分析模型之初始條件,包括地下水壓及初始應力分佈。
6. 模擬施工程序:以逐階啟動或關閉預置之區塊或結構元素,模擬施工行為。
7. Plaxis 運算:依模擬之施工程序,逐階完成計算。
8. 是否收斂:若收斂則進行下一步資料成果判讀,若不收斂需檢討材料性質是否輸入有偏差,或是設定收斂範圍有問題。
9. 結果判讀:進行承载力瞬間總沉陷量、壓力及張力之分析判讀。
- 10.完成(另以 Pcase 驗證厚度)

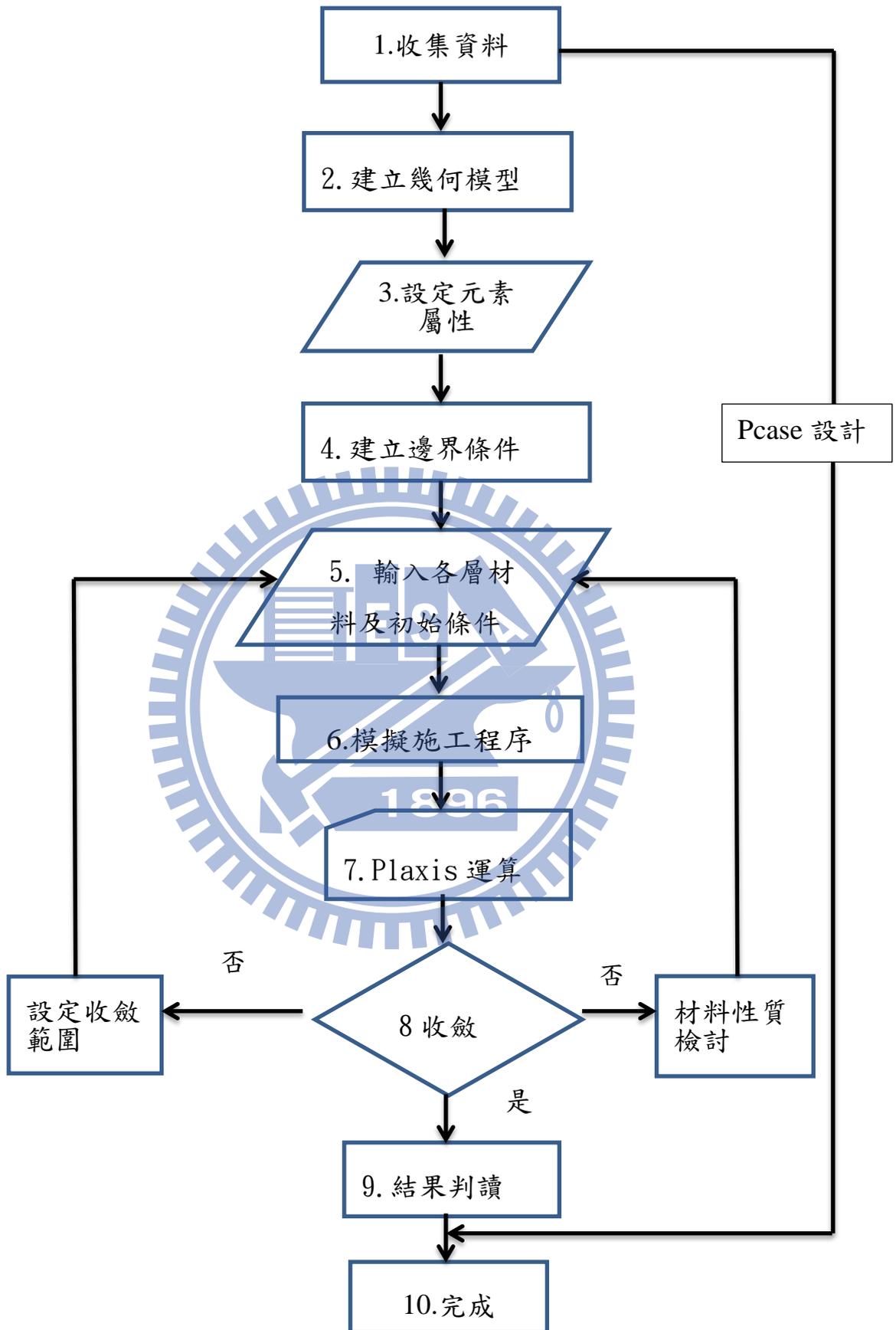


圖 1.2 研究流程

第二章 文獻回顧

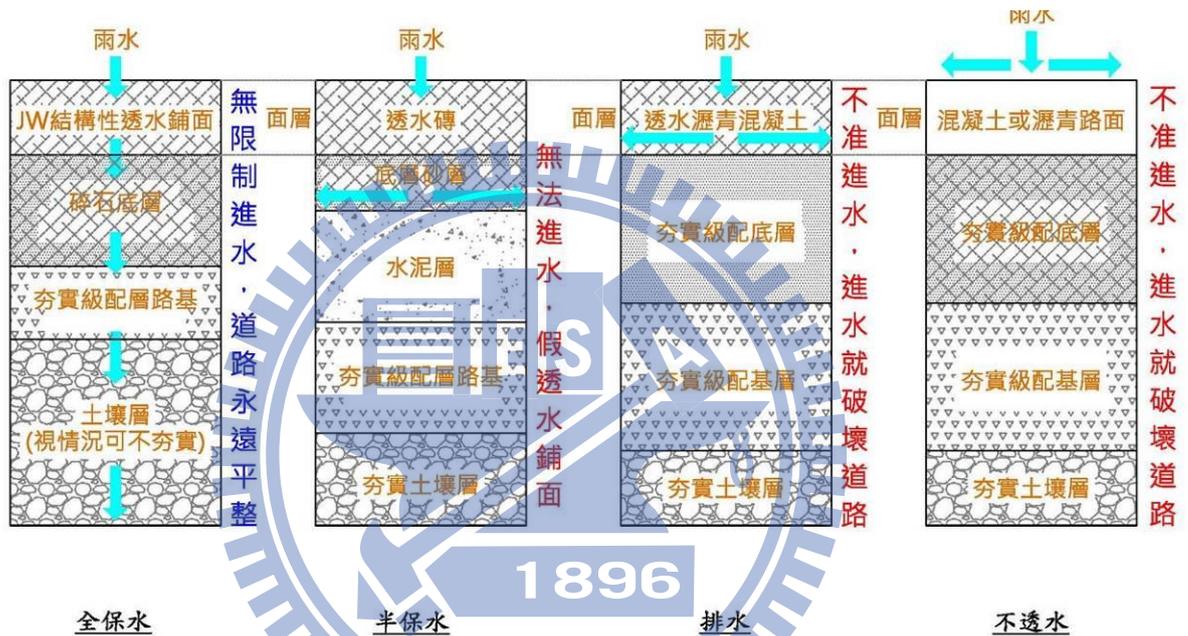
依柳中明教授等(柳中明等,2012)提出要創造海綿城市，城市內的所有人工鋪面，需改變為高承載高透水高透氣鋪面，需具備必要條件如下：

1. 高承載：鋪面的抗壓強度必須達到高運量的道路標準，也即能讓大卡車、重車等通行。
2. 高透水：必須在各地強降雨出現時，表面逕流量趨近於零，也即雨水直接穿透路面。
3. 高儲水：鋪面之下設置相當厚度的碎石層(Krueger and Smitha, 2012)，以儲存雨水，供平日與不時之需，也即是具備海綿功能。
4. 高透氣：必須讓鋪面下樹根與生態系統能夠呼吸，讓生命存活於鋪面之下，也同時在大熱天時允許地下水蒸發而出，達到降溫效益。
5. 增加生態面積：傳統都市治理希望增加綠地面積，但都市開發後，綠地非常珍貴稀少，所以除了綠地生態面積外，還要增加鋪面下的地底生態面積，其在 Liu et al.(2012b)中被稱之為地面下之微濕地(micro-wetland)，其乃當鋪面下的土壤接觸到水與空氣後，所自然發展成之生態系統(Fan et al, 2013)。所以，高承載高透水高透氣鋪面面積，就可稱之為「生態面積」。
6. 平價：無論是造價與長期維護，都必須是平價，如此才可推廣到偏遠地區與開發中及未開發國家。
7. 永續：鋪面的各種特性必須每年檢驗，確認不變，如平整、無裂痕、高承載、高透水、高儲水、高透氣、地下濕地等。也因為如此，長期可以節省鋪面更換或修護所會浪費的資源與經費。

2.1 透水鋪面型式

依透水性而言(陳瑞文,2004)，鋪面可大致區分為「透水鋪面」與「不透水鋪面」兩類。「透水鋪面」是指具有較佳透水性之鋪面，不論其以高孔隙率材料形成多孔隙介質鋪面，或採導水管使雨水可快速穿過鋪面之透水性設計，其均具備使雨水穿透鋪面層而直接入滲至地層之透水功能。而「不透水鋪面」則是指鋪面入滲率接近於零之鋪面材料，常見之混凝土鋪面與瀝青鋪面均屬之。

雨水穿過鋪面層後，其入滲行為將受鋪面底層與環境基層之透水特性所影響。若採用透水性差之鋪面底層設計入滲雨水將直接由鋪面層側邊排除，則形成「排水特性」。若環境基層為透水性較差之黏土或粉土材料所組成，入滲雨水下滲至鋪面底層後將難以滲入環境基層而轉由鋪面底層側邊排除，形成「半保水特性」。若環境基層為透水性較佳之礫石或砂礫材料所組成，入滲雨水將可順利下滲至環境基層之中，進而補注地下水層形成「保水特性」，如圖 2.1 所示。



摘自:結構性透水鋪面與永續地下水資源及生態環境保育

圖 2.1 透水鋪面之保水、半保水與排水特性示意圖

2.2 台灣營建研究院試驗測試報告

依台灣營建研究院「JW 防災空調導水鋪面工法推廣計畫案成果報告」(2004)，JW 工法透水鋪面參考 EFNARC 平版混凝土測試規範，就 60cm x 60cm x 7.5cm 厚度的 JW 混凝土塊，進行垂直點荷載測量，發現其可承受 20~30kg/cm²(相當於面之耐磨耗性可達到 0.51~1.22%；依據台灣標準規範 CNS6471，可溶性硫酸 300~420psi)，而一般大型車輛標準約為 90psi。若是 10 公分與 15 公分厚度的鋪面，則可各承受 30~40 kg/cm²

與 40~60 kg/cm²。測量數據亦顯示：該 JW 混凝土塊的延展性與韌性均佳更重要的是：此導水管的縫隙間，仍可以輔以鋼筋線材，加深混凝土厚度，應用在道路上，承受重壓如圖 2.2。所以，李與鄭(2004)提出可依工程需求，估算 JW 工法透水鋪面厚度的方法。此外，依據台灣標準規範 CNS1232，JW 工法透水鋪面之抗壓強度可達到 1,980 kg f cm⁻²；依據台灣標準規範 CNS1011，JW 鋪面之抗拉強度可達到 74 kg f cm⁻²；依據台灣標準規範 CNS10757，JW 工法透水鋪面僅影響 0.38±0.01；依據美國材料試驗協會標準規範 ASTM C979，鹼性物質完全不會影響 JW 工法透水鋪面，譬如色澤。



台灣營建研究院試驗測試報告

圖 2.2 JW 塑膠架構結構強度(H=15cm)測試相片

2.3 輪胎對路面所造成的應力

依據三維有限元素應用於柔性鋪面之非線性分析(馮天正,2000)，進行鋪面受載重車輛作用下之結構分析時，由於單軸雙輪及雙軸雙輪重車的前後軸、或前-中後軸，以及重車兩側的距離較遠，通常認為其相互影

響較少，為簡化分析時的步驟，一般只考慮局部輪荷重對鋪面之影響。對於典型的重車而言，常以固定的軸間距 122cm(48inch)，及固定的輪間距 34cm(13.5inch)以決定輪荷重的相對位置，如圖 2.3 所示。

輪荷重對鋪面所產生的接觸壓力，分析時常假設為平均分配在胎印上，而輪胎產生的真實胎印，為一近似的橢圓型，通常可以由一個矩型及兩個半圓所組合而成，如圖 2.4a 所示，可假設長度為 L ，而寬度為 $0.6L$ ，因此接觸面積如式(2.1)所示，亦可以接觸壓力及軸重回算出來。另外，長度 L 則如式(2.2)所示。

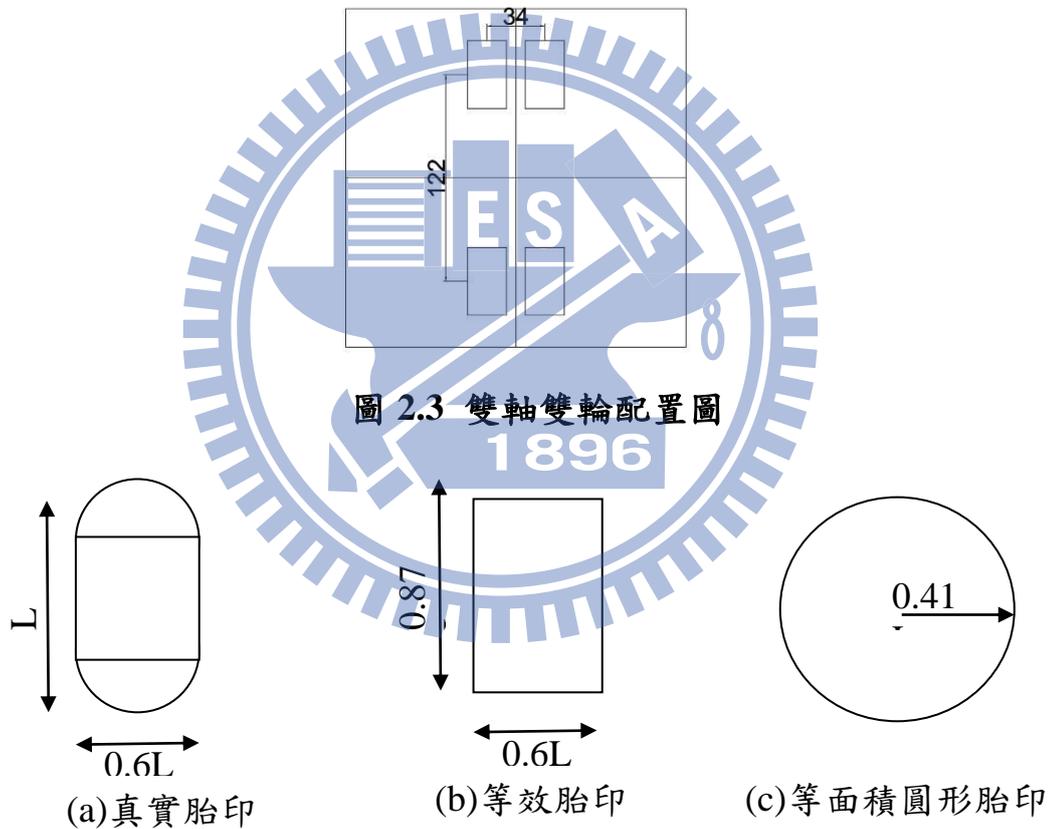


圖 2.4 接觸胎印之尺寸

$$c = \pi(0.3L)^2 + (0.4L)(0.6L) = 0.5227 L^2 \quad (2.1)$$

$$L = \sqrt{\frac{Ac}{0.5227}} \quad (2.2)$$

因此在多軸載重下之鋪面分析，使用三維有限元素分析確有必要。而比較柔性鋪面線性與非線性分析，所得的結果具有一定程度的差異。此外，接觸胎壓對面層底部張應變之影響較大，軸重則對路基頂端壓應變之影響較大。當低軸重下隨接觸胎壓之提高，將使軸重當量因子有明顯的提高，此時軸重當量因子由面層底部張應變控制，而隨著載重的提高，軸重當量因子逐漸由路基頂端壓應變所控制。

以標準單軸軸重 80kN(18kips)，接觸胎壓 483kPa(70psi)加載於單軸雙輪的軸型上為例，假設每一輪胎荷重相同，則各輪荷重 20kN(4.5kips)，接觸面積半徑 a 為 115mm(4.53inch)，兩輪載重中心距離假設為 34.3cm(13.5inch)。輪胎之配置如圖 3.1 及 3.2 所示。對二維的有限元素模擬而言，進行分析時是使用圓型均佈荷重，至於進行三維的有限元素分析，本研究則使用等效胎印作為接觸面積進行分析，用同樣的例子作說明，以式(2.1)計算，得真實胎印之長度 L 為 281.7mm(11.1inch)，所以等效面積之長度為 245.4mm(9.7inch)，而寬度則為 169mm(6.7inch)。對單軸雙輪及雙軸雙輪所使用之真實胎印之長度值 L ，分別列於表 2.1 及表 2.2。

表 2.1 單軸雙輪載重下胎印等效面積之長度值 (cm) (馮天正, 2000)

軸重	胎壓 (kPa)						
	483	552	621	690	759	828	897
kN	483	552	621	690	759	828	897
148	27.05	25.30	23.85	22.63	21.59	20.65	19.84
187	30.43	28.45	26.82	25.45	24.28	23.24	22.33
214	32.54	30.43	28.68	27.20	25.96	24.84	23.88
249	35.13	32.87	30.99	29.39	28.02	26.82	25.78
285	37.57	35.13	33.12	31.42	29.97	28.68	27.56
321	39.83	37.26	35.13	33.32	31.78	30.43	29.24
356	41.99	39.27	37.03	35.13	33.50	32.08	30.81
428	46.00	43.03	40.56	38.48	36.70	35.13	33.76

表 2.2 雙軸雙輪載重下胎印等效面積之長度值 (cm) (馮天正,2000)

軸重	胎壓(kPa)						
	kN	483	552	621	690	759	828
80	28.17	26.34	24.84	23.57	22.48	21.51	20.68
89	29.69	27.76	26.19	24.84	23.70	22.68	21.79
98	31.14	29.13	27.46	26.06	24.84	23.77	22.86
107	32.54	30.43	28.68	27.20	25.96	24.84	23.88
125	35.13	32.87	30.99	29.39	28.02	26.82	25.78
143	37.57	35.13	33.12	31.42	29.97	28.68	27.56
160	39.83	37.26	35.13	33.32	31.78	30.43	29.24
187	43.03	40.26	37.95	35.99	34.32	32.87	31.57

2.4 土壤之彈性模數

土壤各項參數之工程特性，在數值分析的使用上，因絕大部分如 c 、 ϕ 、 γ 等參數多可經由實驗方式求得，因此在使用上較無疑義，惟彈性模數 ES 因土壤取樣之擾動，不能直接採實驗得來的彈性 ES 值進行分析，因此在實務上多以經驗式加以推估。一般而言，土壤彈性模數 ES 與土壤之軟硬度或緊密度約略成正比關係，因此根據 $SPT-N$ 值估計砂性土壤之 ES 值應是合理之作法；黏性土壤則因 $SPT-N$ 值變化範圍較小，故以 S_u 值作為黏性土壤 ES 值之推估基準。

對於黏土之彈性模數 ES ，Bjerrum(1964)研究正常壓密挪威黏土的結果，建議黏土彈性模數 ES 可依下式推求：

$$Es Su = (250 \sim 500) \quad (2.3)$$

砂土之彈性模數 ES 經由 D'Appolonia(1970)、Simond(1977)及 Bowles(1982)等人分別提出可由現地試驗之 $SPT-N$ 值予以推估，如下列公式所示：

$$Es = 50(N + 15) \quad (2.4)$$

$$Es = 1800 + 75N \quad (2.5)$$

$$E_s = (1800 \sim 2200)\ln N \quad (2.6)$$

$$E_s = 80N \quad (2.7)$$

上式(2.2)~(2.5)之彈性模數 E_s 單位為(T/M²)。

歐章煜 (2002) 提出黏土地層在一般分析時之經驗值：

$$E_s S_u = (500 \sim 800) \quad (2.8)$$

Bowles(1982)提出黏土之彈性模數 E_s 可以依下列經驗關係式予以估計，經整理表 2.3、表 2.4 所示。

表 2.3 估計 E_s 的經驗式(摘自 Bowles,1982)

土壤種類	SPT-N(KPa)	CPT(單位與qc相同)
砂(正常壓密)	$E_s=500(N+15)$ $E_s=(15,000\sim 22,000)\ln N$ $E_s=(35,000\sim 50,000)\log N$	$E_s=(2\sim 4) q_c$ $E_s=(1+D_r^2) q_c$
砂(飽和)	$E_s=250(N+15)$	
砂(過壓密)	$E_s=18,000+750N$	$E_s=(6\sim 30) q_c$
礫石土質砂及礫石土	$E_s=1,200(N+6)$ $E_s=600(N+15) \quad N \leq 15$ $E_s=600(N+15)+2,000 \quad N \leq 15$	
粘土質砂土	$E_s=320(N+15)$	$E_s=(3\sim 6) q_c$
粉質砂土	$E_s=300(N+6)$	$E_s=(1\sim 2) q_c$
軟弱粘土		$E_s=(3\sim 8) q_c$
SPT-N試驗打擊數； q_c 試驗之椎尖阻抗； D_r 相對密度 $1\text{KPa}=1\text{KN}/\text{m}^2=0.1\text{t}/\text{m}^2$		

表 2.4 各種土壤 ES 的範圍(摘自 Bowles,1982)

土壤種類	ES(MPa)
非常軟弱粘土	2~15
軟弱粘土	2~25
中等堅硬粘土	15~50
堅硬粘土	50~100
砂質粘土	25~250
粉質粘土	5~20
疏鬆砂	10~25
緊密砂	50~81
疏鬆砂礫石土	50~150
緊密砂礫石土	100~200
頁岩	150~5000
粉土	2~20

註1. 本表僅表示土壤ES之可能範圍，現地土壤的ES 僅與含水量、密度壓力歷史等有關。
 $2.1\text{MPa}=1 \times 10^6 \text{N/m}^2=100\text{t/m}^2$

李維峰等(2003)經匯整相關文獻，轉換 ES 單位為(KPa)所提出之土壤彈性模數 ES 經驗式如表 2.5、表 2.6 所示。

表 2.5 黏土之彈性模數 ES 經驗公式(摘自李維峰等,2003)

試驗參數	土壤型態	經驗公式	單位
不排水剪力強度Su	正常壓密且靈敏性黏土	$E S (200 \sim 500) S_u$	與Su單位相同
	正常壓密及輕度過壓密黏土	$E S =(750 \sim 1200) S_u$	與Su單位相同
	重度過壓密黏土	$E S =(1500 \sim 2000) S_u$	與Su單位相同

表 2.6 砂土之彈性模數 ES 經驗公式(摘自李維峰等,2003)

土壤種類	土壤型態	經驗公式	單位
砂土	礫質	$ES = 1200(N+6)$	KPa
	黏土質	$ES = 300(N+15)$	KPa
	一般砂土	$ES = 2500N$	KPa
粉土	砂質或黏土質	$ES = 300(N+6)$	KPa
	飽和	$ES = 150(N+6)$	KPa

在 Geotechdata.info 中楊氏彈性模數本身於 2012 說明在一般情況下，土壤的硬度和彈性模量取決於土壤的一致性和填料（密度）。其粒狀土壤楊氏模量的典型值為表 2.7，凝聚力性土壤之彈性模數典型值為表 2.8。

表 2.7 粒狀土壤楊氏模量(摘自 Geotechdata.info,2012)

USCS	描述	松 (Mpa)	中 (Mpa)	密 (Mpa)
GW, SW	礫石/沙級配良好的	30-80	80-160	160-320
SP	沙子，均勻	10-30	30-50	50-80
GM, SM	沙/礫石粉質	7-12	12-20	20-30
GW, SW	礫石/沙級配良好的	30-80	80-160	160-320

表 2.8 凝聚力性土壤之彈性模數(摘自 Geotechdata.info,2012)

USCS	描述	很軟到軟 (Mpa)	中 (Mpa)	僵硬很僵硬 (Mpa)	硬 (Mpa)
ML	淤泥有輕微的可塑性	2.5 - 8	10 - 15	15 - 40	40 - 80
ML, CL	粉土的塑性低	1.5 - 6	6 - 10	10 - 30	30 - 60
CL	粘土與低塑性中等	0.5 - 5	5-8	8 - 30	30 - 70
CH	粘土具有高的可塑性	0.35 - 4	4 - 7	7 - 20	20 - 32
OL	有機淤泥	-	0.5 - 5	-	-
OH	有機粘土	-	0.5 - 4	-	-

2.5 材料之強度包絡線

2.5.1 強度包絡線與破壞包絡線

就任一可壓縮材料而言，我們均可藉加圍壓力(confined pressure)來促使材料壓縮而增加其強度，各不同圍壓下材料破壞時之應力摩爾圓如圖 2.4 所示，若以一包絡線來涵蓋這些摩爾圓，則該包絡線表示材料所能承受應力之一界限，任何表示材料應力之摩爾圓均不能超出此一界限，超出此一界限則材料破壞，此一界限線稱為材料之破壞包絡線(failure envelope)，又稱材料之強度包絡線(strength envelope)。

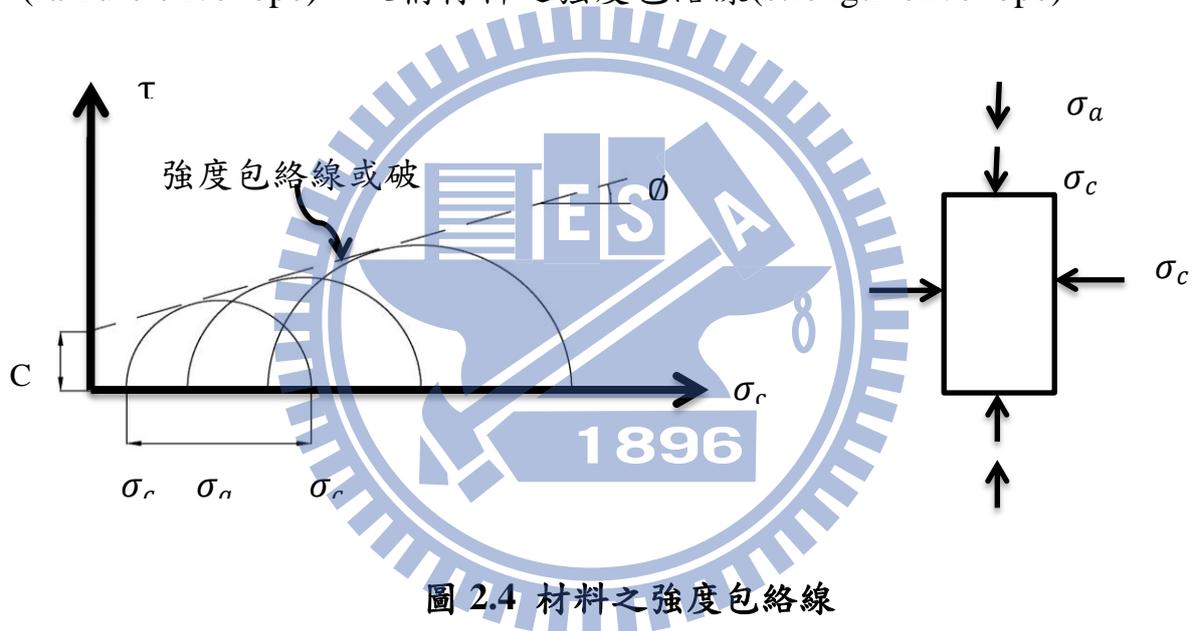


圖 2.4 材料之強度包絡線

如圖 2.4 所示，若採 Mohr- Coulomb 的破壞準則假設強度包絡線為一直線時，表示該直線之二參數 c 與 φ 稱為剪力強度參數 (shear strength parameter)，若材料為理想固體材料(即完全無孔隙存在，亦即不可壓縮材料)時，材料強度將不隨圍壓力增加，可得 $\varphi = 0^\circ$ 之強度包絡線，就任一具孔隙之地質材料而言，其 φ 值應不等於 0° ，除非讓材料處於完全不可壓縮狀態，才可得 $\varphi = 0^\circ$ 之強度包絡線。

圖 2.4 中繪摩爾圓所周軸差應力 σ_d (deviator stress，是造成材料受剪之應力)若取圖中之尖峰值者，所得強度包絡線為尖峰強度包絡線，強

度參數稱尖峰強度參數以 c_p 、 ϕ_p 表之，若軸差應力係取殘餘值者，則所得為殘餘強度包絡線而以 c_r 、 ϕ_r 參數表示之。

2.5.2 土壤的剪力強度及破壞準則

根據庫倫 (Coulomb, 1776) 的試驗研究成果，砂土的抗剪強度 $\tau_f = \sigma \tan \phi$ 中。乾且疏鬆的砂土在自然狀態能維持的最大斜坡角稱為安息角，此安息角與 ϕ 角相近，但緊密的砂土， ϕ 角比安息角大 5~10 度。後庫倫又提出黏性土的抗剪強度為 $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$ 式，此式是所謂的庫倫剪力強度破壞準則。文依據 Terzaghi 的有效應力概念，認為土壤只有土粒才能提供剪力強度或摩擦力，水及空氣則無摩擦力的言，因此，改寫為

$$\tau_f = (\sigma - u) \tan \phi' = \sigma' \tan \phi' \quad (2.9)$$

及

$$\tau_f = C' + (\sigma - u) \tan \phi' = C' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.10)$$

(2.9) 及 (2.10) 式為總應力表示法，而 (2.9) 及 (2.10) 式則為有效應力表示法。若以 σ 為橫軸， τ 為縱軸，將庫倫剪力強度破壞準則以圖 2.5 表示，可看出該準則成線性關係。一般以 (7.3) 及 (7.6) 式為通式，若為砂土則 $c=c'=0$

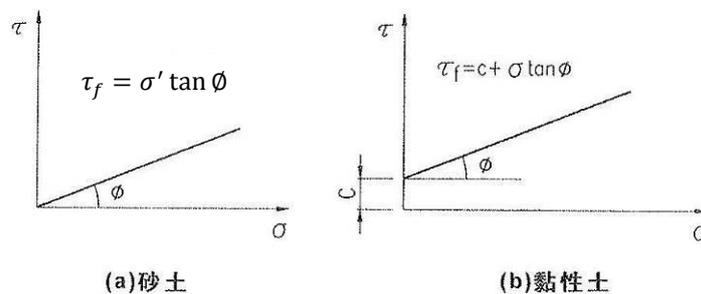


圖 2.5 庫倫剪力強度破壞準則

同一性質的土體在不同的正向應力作用下達到破壞，將這些破壞時的應力點之連線稱為破壞包絡線(Failure Envelope)，圖 2.6 之 τ_f 線，圖中 A 應力圓在 τ_f 線以下 顯示該土體處於穩定狀態；B 應力圓與 τ_f 線相切，表示該土體在某一斷面處於極限平衡狀態；C 應力圓超出 τ_f 線，表示該土體有也許多斷面之剪應力已超過抗剪強度而破壞，但實際上這種情形是不存在的，因為該土體在 B 應力圓早已壞了。莫爾圓與 τ_f 線相切時，土體應力處於極限平衡狀態，以此作為土壤的破壞準則，稱為莫爾-庫倫破壞準則(Mohr-Coulomb Failure Criteria)。 但要注意，破壞包絡線並非直線，祇是在一般的工程應力接近直線，實務上常以直線處理之。

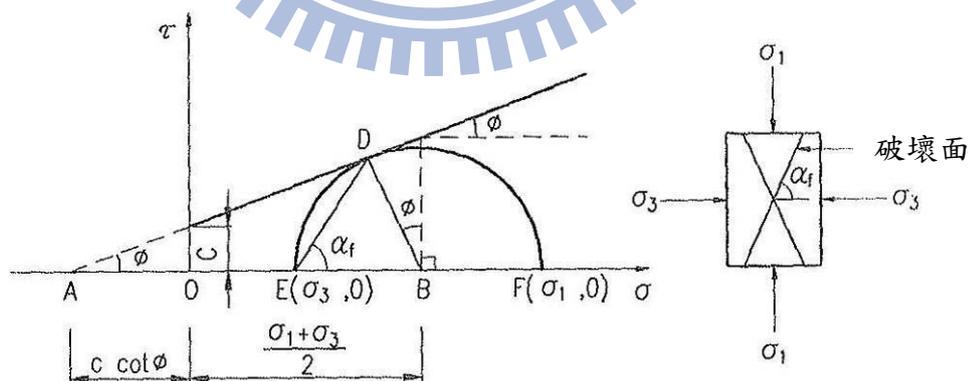
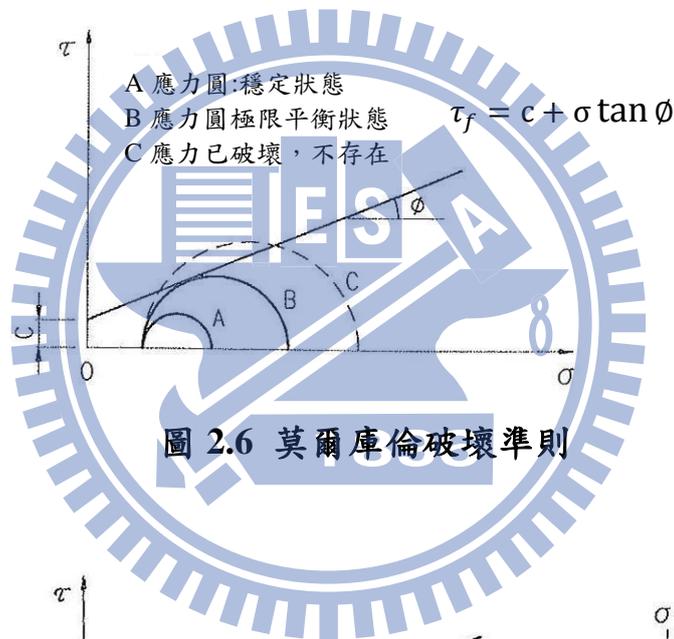


圖 2.7 土壤極限平衡之應力莫爾圓及破壞面示意圖

$$\sin \phi = \frac{\overline{BD}}{\overline{AB}} = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{C \cos \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \left[2C \frac{\cos \phi}{\sin \phi} + (\sigma_1 + \sigma_3) \right] \sin \phi$$

$$\sigma_1(1 - \sin \phi) = \sigma_3(1 + \sin \phi) + 2C \cos \phi \quad (a)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 2c \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$\text{式中 } \cos \phi = \sqrt{1 - \sin^2 \phi} = \sqrt{(1 + \sin \phi)(1 - \sin \phi)}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (2.11)$$

$$\text{令 } K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (2.12)$$

$$\text{則 } \sigma_1 = K_p \sigma_3 + 2\sqrt{K_p} c \quad (2.13)$$

將(a)式移項得

$$\sigma_3(1 + \sin \phi) = \sigma_1(1 - \sin \phi) - 2c \cos \phi$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} + 2c \sqrt{\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}} \quad (2.14)$$

$$\text{令 } k_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \quad (2.15)$$

$$\text{則 } \sigma_3 = \sigma_1 k_a - 2c \sqrt{k_a} \quad (2.16)$$

根據莫爾圓的觀念，圖 2.7(a)中 E 點為平面圓點。又 D 則為破壞點，所以 \overline{DE} 為破壞面，與水平面之夾角為 α_f ，在試體中的狀況如圖 2.7(b)所示。在 $\angle DBF = 90^\circ + \phi$ 且為 DE 弧的圓心角， $\angle DBF$ 為 OF 弧之圓周角，故

$$\alpha_f = \frac{1}{2}(90^\circ + \phi) = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (2.17)$$

由此可知，共同的破壞面中，鈍角的角平分線為 σ_3 方向，銳角的角平分線為 σ_1 方向，此結論在工程地質中常應用在主應力方向的研判。另外，在岩石力學中常以 σ_3 為橫軸， σ_1 縱軸，繪示破壞最大主應力與最小主應力之關係如圖 2.8 所示，截距 b 、斜率 m 與強度參數 c ，之關係可推導如下：

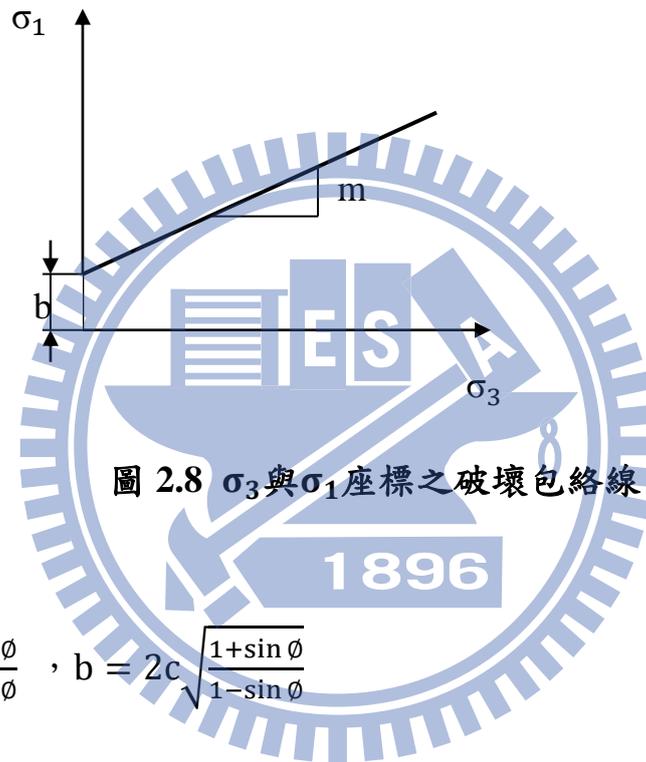


圖 2.8 σ_3 與 σ_1 座標之破壞包絡線

$$m = \frac{1+\sin \phi}{1-\sin \phi} \quad , \quad b = 2c \sqrt{\frac{1+\sin \phi}{1-\sin \phi}}$$

整理得

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{m-1}{m+1} \right) \tag{2.18}$$

$$c = \frac{b}{2\sqrt{m}} \tag{2.19}$$

2.6 剛性混凝土鋪面破壞模式

2.6.1 剛性鋪面破損原因

由於本研究 JW 鋪面係屬剛性路面，因此與剛性鋪面損壞的原因均相同，造成破壞原因複雜，其破壞常常由幾種原因互相影響聯合造成的，這些因素包含設計、施工不良、天候的因素、不當的維護、外力的超載等個別或聯合所造成(陳治中,2001)。造成鋪面版破壞的主要關鍵因素，大致可以歸納如下(陳治中,2001)：

1. 交通載重

混凝土鋪面承受設計範圍內的荷重不至於造成混凝土損壞，但國內超載情況嚴重，若以公路來說，會造成剛性鋪面破壞的荷重，大多來自於大卡車等重車的超載；此外，混凝土鋪面若承受重複輪軸載重，雖荷重未達破壞應力，但反覆荷重也會使得混凝土產生疲勞現象進而產生破壞。以鋪面的破壞而言，載重所造成的破壞可能到達軸重比的四次方倍，因此交通載重可以說是鋪面破壞最主要因素之一，所以各國交通法規大多會明定載重限制，以使鋪面正常使用年限達到設計年限。

2. 環境因素

溫、濕度的影響對剛性鋪面而也是重要的破壞因素，其變化會引起鋪面版體積的變化，尤其是溫度的變化。因為台灣地屬亞熱帶，剛性鋪面常受到高溫的日照，版塊表面的溫度逐漸傳遞至版底形成溫度梯度，由於造成鋪面版塊上、下緣的溫差，使得鋪面版上拱或下凹，進而使鋪面產生翹曲應力而發生破壞。另剛性鋪面在溫度與乾縮聯合所產生的作用應力，可能達混凝土張力強度的 70% 甚至 80%；至於溼度對剛性鋪面的影響也與溫度影響相似，只是程度上的差異而已，所以環境因素所造成的應力，有時可能高於輪荷重的應力，對於環境的影響，不可不重視。

3. 化學作用

由於混凝土是種複合材料，其間進行著複雜的化學反應，一般新拌混凝土的 pH 值介於 12~13，使得混凝土處於高度的鹼性，在這種條件情況下，鋼筋是受到良好保護的。但如果混凝土保護層受到破壞，鋼筋便會逐漸腐蝕，使得混凝土產生微裂縫，進而加速鋪面的破壞；鹼骨材反應也是常見的破損原因，若使用具有活性的骨材時，在潮溼的情況下，混凝土中的鹼性金屬（來源：可能源自水泥或是外來的）與活性矽骨材發生鹼骨材反應，產生鹼矽膠體，由於這種反應會伴隨著膨脹，造成張力裂縫，暴露的表面會顯示出地圖狀的裂紋，降低混凝土鋪面的強度及耐久性。

4. 基底層的影響

剛性鋪面的設計理念為直接將剛性鋪面版鋪築於路基層上，或是先加鋪基層再鋪築混凝土版。因此，此種鋪面是以其面層抵抗外力荷重，但基底層的支承狀況亦有極大的影響；若施工前未對填土加以壓實，將可能使基底層土壤產生可壓縮性或膨脹性，造成支承力的不足，日後容易因應力不均而造成鋪面版的破壞。

5. 施工問題

剛性鋪面在尚未開放交通前，就有可能發生破損，這些破損的原因多是由於施工不當或品質管制不良所引起的。例如：未確實養護造成混凝土龜裂、施工任意加水造成過度泌水或混凝土輸送未按規定程序等，這些因為人為疏失或配比不當等因素，使得混凝土鋪面不符合原設計的需求，未來開放交通後，會更加速其破壞，縮短服務年限；此外，亦常見到設計不良所造成的破損，這些如綴縫筋設置位置不當、鋪面接縫寬度不足或鋸縫時機太晚等，都會降低鋪面服務績效，因此，對於這類問題的防治必須依賴嚴密的施工規範和嚴格的品管。

2.6.2 剛性鋪面破損種類

剛性鋪面在設計理念、材料選用、使用對象、開放交通後的使用成效，與柔性路面相異，所以其破壞模式也與柔性鋪面不同。美國聯邦航空總署(FAA)於 1982 年即提出機場鋪面維修指導手冊建議報告，及淡江大學李英豪教授在其中對於剛性鋪面的破損種類，與其因素做整理並說明；因此整理國內外相關文獻，並參酌國內相關的剛性鋪面破損調查，歸納出剛性鋪面破損種類及其原因。常見的破損種類包含有：橫向裂縫、縱向裂縫、角隅裂縫與角隅斷裂、版間落差、版邊崩損、擠壓破損、填縫料損壞、表層損壞、附屬結構物周邊破壞及 D 型裂縫等，並參酌相關國外對剛性鋪面破損定義文獻(陳治中,2001)，彙整如下表 2.6.1 及表 2.6.2(陳治中,2001)。



表 2.6.1 一般剛性鋪面常見的破壞模式與肇因(陳治中,2001)

種類	現象	破損肇因
橫向裂縫	橫向裂縫大部分與鋪面版中心線幾近垂直，或與行車方向垂直之裂縫，其深度通常達版底，嚴重時兩側會有高差現象。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 施工時並沒有確實養護，加上天氣乾燥、風所引起的塑性收縮。 2. 設計不當，例如鋪面厚度不足而抗彎強度過低、橫向接縫間距不當或設計版塊長寬比不當。 3. 若裂縫發生於版中央，主要是因為溫、溼度改變所產生的應力，加上外力荷重作用而產生版塊裂損。 4. 若裂縫發生於距接縫2-3 公尺以內，主要是因為填縫料剝落引發唧水現象，使得路基支承立不足所致。 5. 若裂縫發生於距接縫30 公分(60cm)以內，則主要是因為距縫時機太晚，或距縫深度不足所致。
縱向裂縫	縱向裂縫大部分與鋪面版中心線幾近平行，或與行車方向平行之裂縫，其深度通常達版底，嚴重時兩側會有高差現象。通常輕度的裂縫破壞是由於含水量變化或摩擦引起，而中度或重度裂縫破壞認定為主要的結構破壞。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 設計不當，如鋪面厚度、接縫間距不足或設計版塊長寬比不當。 2. 施工、品管不良，如縱向接縫建造不良、距縫施工不當、距縫時機太晚或深度不足。 3. 重載交通荷重反覆作用，疲勞使得混凝土發生破損。 4. 若裂縫發生載距板塊邊緣30 公分以內，可能因為繫筋施工不當所致。 5. 若裂縫為發生在版塊中央之連續裂縫，可能因為版中溫、溼度應力及水份變化所引起版之收縮或翹曲，加上外力荷重所產生的版塊裂損。 6. 基層承载力喪失，進而支承力不足，如地下管線破損造成下層級配流失。
角隅裂縫與斷裂	角隅裂縫為裂縫距角隅 1.8公尺，在縱向接縫與橫向接縫所形成之三角形裂縫，通常其邊呈45°角；而角隅斷裂為剛性鋪面版在角隅部份產生了貫穿鄰近橫向或縱向的斷裂，通常斷裂在角隅兩邊的長度從0.3 公尺至版寬的一半。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 接縫結構不全，使得相鄰板塊間之力傳遞不良。 2. 設計不當，如鋪面厚度不足使得鋪面承载力不佳。 3. 橫向或縱向接縫施工不良所致，或是鋸縫施工不當如距縫時機太晚或深度不足。 4. 版塊邊緣底層支承力弱化，如填縫料損壞，導致水分侵入底層，加上外力荷重作用，併發唧水現象進而掏空底層。 5. 版塊受溫度應力而引起的版塊收縮或翹曲，加上外力作用導致。
版間落差	相鄰的版塊與版塊間有高低不平的現象。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 接縫處傳遞荷重能力不佳。 2. 路基或底層之壓實度不足。 3. 唧水現象或地下管線滲漏，因底層細粒料被水帶走，造成支承力不均而發生差異沈陷。 4. 底層受水膨脹，造成版塊位移。

版邊崩損	填縫料長草、剝脫等破壞或接縫邊角沒有修磨圓角或接縫處有異物嵌入，造成版邊有局部崩損現象。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 若其崩損為一長條狀，其可能為鋸切接縫時機不當。 2. 應力集中，造成弱面崩損。 3. 接縫失敗，引發唧水現象，掏空基層後，使得基礎支承载力不足。
擠壓破損	鋪面版在接縫處或裂縫附近產生局部向上的翹曲，鋪面版產生斷裂而呈現不平整現象，其破壞斷面呈現楔型狀，一般隆起區域會伴隨著混凝土碎塊的發生。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 路基支承载力不足或不均勻沈陷，使版塊向接縫處傾斜下陷，導致版塊上部產生壓應力而造成擠壓破損。 2. 填縫料異物嵌入，例如石子或土壤填積，使得鋪面版受溫度變化膨脹時，鋪面版並沒有足夠的空間擴張，於是內應力產生了翹曲，這通常發生在接縫或裂縫附近。
填縫料損壞	指不可壓縮物質或水滲入接縫之中，或填縫料與縫壁分離、剝落散失或填縫料龜裂、長草。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 填縫料施工不當凸出版面，或版塊擠壓造成填縫料凸出後，遭車輪輾壓拉離縫槽。 2. 施工品質不良，如填縫料混合比例不當或不均勻、縫壁不潔，或施工時氣候不合乎規定，致使填縫料黏結強度不良。 3. 填縫料超過使用年限，產生老化、硬化，進而內聚力喪失。 4. 鋸縫寬度不佳或其鋸縫形狀不良。
表層損壞	版塊表面有局部的坑洞、剝落、光滑、風化或侵蝕等損壞，導致駕駛人舒適感降低、增加行車者使用成本、或造成安全上的危害。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 若發生一般坑洞，其直徑約2.5~10公分，深度約1.3~5公分間，其可能原因為混凝土品質不良、施工不良與輪荷重或環境影響。 2. 鋪面版發生片狀或鱗狀剝落現象，而版塊內的骨材明顯可見時，其可能的原因為混凝土品質不良、級配設計不當或冬季鋪面撒鹽，鹽水結冰後溶解。 3. 若鋪面版表面結構紋路被磨損，使得骨材暴露，而被磨成光滑的外表，這可能的原因為使用軟質骨材、輪荷重的磨光作用或壓時度不足等影響。 4. 若鋪面表面摩擦力降低，會影響交通安全，這種抗滑力污染(Contaminants)係由於輪胎橡膠堆積在鋪面表面所致。
結構物周邊破壞	版塊中有集水井、電力、電信人孔等附屬結構建物，在其周邊之混凝土版塊有輻射狀的裂縫現象，若損壞嚴重，會有下陷現象產生。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 若是發生在方形人孔四角的裂縫，其主要可能的原因係由方形人孔在外力下，其四角應力集中現象所造成。 2. 施工不當，未將結構建物與版塊隔離。
D型裂縫	又稱“耐久性裂縫”，一般與接縫或裂縫呈平行，多發生於接縫或路面邊緣兩側，且裂縫細、多且密。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 主要是因為鋪面混凝土版無法承受環境因素，如凍融循環的作用所致。 2. 若D型裂縫版塊上並有模糊不清的圖形狀裂縫，則可能是因為某一類粒料在潮溼環境與水泥內鹼性成份產生鹼粒料作用所致，所以須對模糊不清的圖形狀裂縫另行檢測。

表 2.6.2 一般剛性鋪面破損等級(陳治中,2001)

破損種類	破損等級		
	低		低
橫向裂縫	裂縫寬度小於0.3 公分(0.125in.)，沒有任何剝脫現象，也沒有可量測高差現象，並且其填充良好者。	橫向裂縫	裂縫寬度小於0.3 公分(0.125in.)，沒有任何剝脫現象，也沒有可量測高差現象，並且其填充良好者。
縱向裂縫	裂縫寬度小於0.3 公分(0.125in.)，沒有任何剝脫現象，也沒有可量測高差現象，並且其填充良好者。	縱向裂縫	裂縫寬度小於0.3 公分(0.125in.)，沒有任何剝脫現象，也沒有可量測高差現象，並且其填充良好者。
角隅裂縫與斷裂	裂縫發生剝脫的長度佔裂縫總長的10%以下，也沒有發生可量測的高差現象，並且角隅未發生斷裂成兩塊或更多者。	角隅裂縫與斷裂	裂縫發生剝脫的長度佔裂縫總長的10%以下，也沒有發生可量測的高差現象，並且角隅未發生斷裂成兩塊或更多者。
版間落差	兩相鄰版塊高差在0.3~1公分(0.125~0.375in.)者屬之。	版間落差	兩相鄰版塊高差在0.3~1公分(0.125~0.375in.)者屬之。
版邊崩損	以接縫中心算起，其剝脫區域寬度在7.5 公分(3in.)以下，沒有任何或少部份粒料散失，並且沒有修補過者。	版邊崩損	以接縫中心算起，其剝脫區域寬度在7.5 公分(3in.)以下，沒有任何或少部份粒料散失，並且沒有修補過者。
擠壓破損	導致行駛車輛輕微跳動，但不會產生不舒適感	擠壓破損	導致行駛車輛輕微跳動，但不會產生不舒適感
填縫料損壞	填縫料大致良好，只有少部份老化、硬化等，其填縫料損壞的長度小於10%接縫的長度，或損壞長度在30公分以下者。	填縫料損壞	填縫料大致良好，只有少部份老化、硬化等，其填縫料損壞的長度小於10%接縫的長度，或損壞長度在30公分以下者。
D型裂縫	裂縫覆蓋範圍為整個版塊的15%以下，裂縫緊密，並且無任何剝落現象，其影響區域沒有修補，或發生損壞區域3m ² 者。	D型裂縫	裂縫覆蓋範圍為整個版塊的15%以下，裂縫緊密，並且無任何剝落現象，其影響區域沒有修補，或發生損壞區域3m ² 者。

2.7 PCASE 程式之驗證

在國內各公路主管機關所使用之鋪面厚度設計方法，大都沿用美國經驗為主，而剛性路面是在底層上方鋪築無筋混凝土版或鋼筋混凝土版，以版本身所提供的強度來抵抗交通量所產生的撓曲變形。所以，在探討鋪面結構行為上，為了符合力學理論基礎及接近實際情況，必須有一較確實、具整體性的研究工具，從路面建造設計之客觀影響因子，包括交通荷重、溫度、降雨及路基土壤等之探討分析進而進行鋪面結構整體之績效評估。目前在美國國防部所屬陸軍工兵團工程研究中心（U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Construction Engineering Research Laboratory）所自行開發的一套鋪面軟體 PCASE（Pavement-Transportation Computer Assisted Structural Engineering）便是在於建立配合交通、溫度、凍融、降雨、土壤……等多項客觀因子不同組合狀況之剛柔性鋪面結構設計方法。

一般鋪面之設計因子，主要在交通量、路基土壤之設計 CBR 值、R 值、Mr 等，可採用美國陸軍工兵團(US Army Corps of Engineers) 所發展之 PCASE 程式進行設計。唯本研究因設計之目標不同，因容許雨水入滲，底層(透水級配或碎石)之厚度未必為交通承载力所控制，亦可能用蓄水容量控制，故與傳統之不透水設計理念略有不同，因此本研究後續將與 Plaxis 成果判讀之厚度做驗證。

第三章 研究方法

3.1 PLAXIS 有限元素法軟體

PLAXIS 分析程式使用，乃荷蘭 DELFT 技術大學(Delft University of Technology) 於 1987 年所開始發展者。它主要應用於土壤及岩石工程之分析，並可計算土壤與結構間互制行為，應用範圍包括基礎工程、深開挖工程、隧道工程、邊坡穩定工程、路堤填土工程等。程式內建元素有固體元素及版元素等，可用以模擬土壤岩體及人為構造物；材料應力應變行為模式則提供有線性彈性、Mohr-Coulomb 等多種選擇 PLAXIS 程式已流通使用於國內外工程界及學校與研究機關。本研究案所使用的 2013 年 PLAXIS 3D 及 2009 年 PLAXIS 9.02 版，其主要之功能如下：

使用二維平面元素、界面元素、梁元素及桿元素等進行二維平面應變及三維軸向對稱問題之分析。使用者可選擇土壤元素(soil element)進行分析，元素之勁度矩陣以高斯點或應力點進行數值積分後予以決定；梁元素(beam element)主要用來模擬具有撓曲剛度及軸向勁度之牆、版結構系統；支撐元素(anchor/strut element)主要用來模擬具有軸向勁度之支撐系統。

以繪圖方式輸入網格節點及邊界條件，自動建立有限元素網格，並可由使用者調整格網之疏密程度以符合分析時精確性之要求。

於分析時可自行定義的土壤組成率模型 PLAXIS 程式是世界最先進且使用最人性化的大地工程軟體，可分析各種土工及土壤、結構互制的問題：隧道、深開挖、邊坡穩定、加勁擋土牆、土釘、地錨、筏式基礎、樁基礎、滲流等，及 2D、3D、Dynamic 各項問題，可稱為解決大地工程與土壤結構互制無所不能的利器，同時亦是世界土壤力學會議和國內大地工程研討會近年來討論最熱烈的軟體。

近年來，各項大地工程問題趨於複雜且困難，例如隧道交叉段、複雜基礎結構物、捷運隧道與大樓樁基礎之互制行為，如採傳統 2D 分析有其侷限性。PLAXIS 3D 在 2010 年推出，係整合 PLAXIS B.V. 公司旗下之 3D Foundation 及 3D Tunnel 程式之所有功能，以方便之輸入方式、較多選擇之土壤模式、可靠之計算核心及精細的後處理功能，以全 3D 方式解決大地工程問題。由於鋪面之輪軸分佈係 3D 分佈，採用 2D 程式無法顯示 3D 分佈之情況，故本研究案採用 PLAXIS 3D 做為主要分析工具。

PLAXIS 是一個專門用於土木工程變形和穩定性分析的有限元計算程式。通過簡單的輸入過程可以生成複雜的有限元模型，而強大的輸出功能可以提供詳盡的計算結果。計算過程以穩定的數值方法為基礎，本身完全自動。

許多方法可以用來模擬土壤及結構的力學行為，它們的精度各不相同。例如，線性及各向同性彈性的 Hooke 定律是可以得到的最簡單的應力—應變關係。由於它僅僅涉及到兩個輸入參數，即楊氏模量 E ，和泊桑比 ν 。通常認為這種應力—應變關係太簡化了，不能把握土木行為的本質特點，然而，對於大量結構單元和岩石層的類比，線彈性性質往往是比較合適的。由於 PLAXIS 內建 Linear-elastic、Mohr-Coulomb、Soft-Soil、Hardening-Soil、Soft-Soil-Creep 及 Modified Cam Clay Model 等土壤組合律模型，本研究為不考慮土壤硬化、軟化以及潛變行為，且為分析 JW 混凝土版內部之應力應變分佈，則全部採用 Mohr-Coulomb 理論作分析。

Mohr-Coulomb 彈塑性模型要用到 5 個基本輸入參數，即表示土體彈性的 1. 楊氏模量 (Young's modulus) E 和 2. 泊松比 (Poisson's ratio) ν ，及表示土體塑性的 3. 內聚力 c (Cohesion) 和 4. 摩擦角 ϕ (Friction angle)，以及 5. 剪脹角 ψ (Dilatancy angle)。Mohr-Coulomb 模型描述了對土木行為的一種‘一階’近似。這種模型被推薦用於問題的初步分析。對於每個土層，可以估計出一個平均剛度常數。由於這個剛度是常數，計算往

往會相對較快，可以得到變形的一個初步印象。除了上述提到的五個模型參數，初始的土體條件在許多土體變形問題中也起著關鍵的作用。通過選擇適當的 K_0 值，可以生成初始水準土應力。

1. 楊氏模量 E (Young's modulus)

PLAXIS 用彈性模量作為彈性模型和摩爾-庫倫模型的基本剛度模量，但是模型裡也會提供一些替代的剛度模量。剛度模量具有應力量綱（力每單位面積）。因為許多土工材料從一開始載入起就表現出非線性性狀，所以要特別注意計算採用的剛度參數。



圖 3.1 E_0 和 E_{50} 的定義

在土木力學裡，初始斜率通常用 E_0 表示，對應於 50% 強度的割線模量記為 E_{50} （見圖 3.1）。對於有很大線彈性範圍的高度超固結粘土和岩石，使用 E_0 是符合實際的；而對於砂土和接近正常固結的粘土，使用 E_{50} 更合適。

土的初始模量和割線模量會隨著圍壓增加而增加。因而，深層土的剛度會比淺層土更大。另外，觀察到的剛度還取決於應力路徑。卸載和再載入條件下的剛度，比最初載入條件下的剛度要高得多。還有，用彈性模量表示的土體剛度，在排水壓縮條件下的觀測值，一般小於在剪切條件下的觀測值。所以，當使用剛度模量常數來描述土體性狀時，應當選擇符合應力水準和預期應力路徑的值。

PLAXIS 的高級模型裡考慮了某些土木性狀對應力的依賴性，見材料模型手冊。對摩爾-庫倫模型，PLAXIS 提供一個特殊選項，用來輸入隨深度增加的剛度（見高級參數）。

2. 泊松比 ν (Poisson's ratio)

標準三軸排水試驗在軸向開始載入時，可能會產生一個明顯的體積縮小率。這就對應於一個低的泊松比初始值 (ν)。在某些情況下，例如特殊卸載問題，可能應用這樣的低泊松比初始值是符合實際的。但是，在應用摩爾-庫倫模型時，一般建議使用較大值。

當彈性模型或摩爾-庫倫模型用在類比重力載入（在塑性計算裡 ΣM_{weight} 從 0 增加到 1）時，泊松比很容易確定。對於這類載入，PLAXIS 需要繪出的實際比值 $K = \sigma_h / \sigma_v$ 。因為這兩類模型都會給出一維壓縮的常見的比值 $\sigma_h / \sigma_v = \nu / (1 - \nu)$ ，由此很方便確定一個泊松比來得到符合實際的 K_0 。也就是說，是通過和 K_0 對應來估計 ν 值的大小。這些處理初始應力分佈的有關內容，在附錄 A 裡有更詳盡的闡述。 ν 值的大小在很多情況下都介於 0.3 和 0.4 之間。這個值除了可以用在一維壓縮的情況，也可以用在其他的載入條件。

3. 內聚力 c (Cohesion)

內聚力強度具有應力的量綱。PLAXIS 可以處理無粘性砂土 ($c = 0$)，但是在這種情況下一些操作可能會不理想。為了不使問題複雜化，建議經驗不足的用戶至少輸入一個較小的值 ($c > 0.2$ kPa)。PLAXIS 提供一個特別選項用來輸入土層，土層上的內聚力隨深度增加而增加（見高級參數）。

4. 摩擦角 ϕ (Friction angle)

摩擦角的輸入單位為度。大的摩擦角—比方有時從密度得出的一會使塑性計算量增加很多。

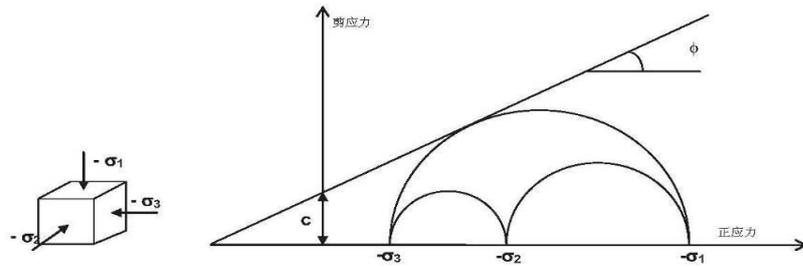


圖 3.2 應力圓：其中一個和 Coulomb 包線相切

計算所需要的時間大體上隨摩擦角呈指數增加。因而，在針對某個特定工程項目之進行初始計算時，要避免出現大摩擦角。如圖 3.2 中應力圓所表示的那樣，摩擦角在很大程度上決定了抗剪強度。所以在用到的摩擦角大於 35 度時，計算時間會大大延長。

5. 剪脹角 ϕ (Dilatancy angle)

剪脹角用度表示。除非是高度超固結土層，粘土根本無剪脹性（即 $\phi=0$ ）。砂土的剪脹性取決於密度和摩擦角。石英砂的剪脹角範圍為 $\phi=\phi - 30^\circ$ 。但是，在大多數情況下，因為 ϕ 小於 30° ，剪脹角就等於零。只有極其疏鬆的松砂的 ϕ 略低於零。

3.2 分析參數

3.2.1 土壤參數

本研究土壤行為模式將使用固體元素 (Solid Element) 並採用 Mohr-Coulomb 彈塑性模式，並依據地質調查報告所示之地層參數，及參酌相關捷運設計圖說之鑽探資料等建立分析用土層參數，來進行分析模擬。

土層參數中 E 為土壤之楊氏模數 (Young's modulus)， ν 為泊松比 (Poisson's ratio)。因砂性土壤 E 值與標準貫入試驗 N 值成正比，故砂性土壤之 E 值以下式估算 (詳見 2.4 節)：

$$E = (2000 \sim 3000) N \quad (\text{kPa}), \text{取 } 2500 \cdot N$$

而黏性土壤之E值則由下式估算。

$$E = (500 \sim 1000) Su \text{ (kPa)}, \text{ 取 } 500 \cdot Su$$

3.2.2 地下水壓分佈

PLAXIS 程式中水壓力(孔隙水壓力與超額水壓力)可由兩種方式產生：直接給定一個地下水位及水頭或間接經由地下水流網計算得到的結果。本案考慮水壓呈靜態分佈，直接定義地下水位面，在地下水位以下則假設為靜態水壓分佈，地下水位將會自動引用到所有群組去產生孔隙水壓，如果受到作用的話，程式也可以產生超額孔隙水壓。

本案地下水位分佈線以靜態模式(Steady State，即不隨時間變化)輸入數值程式，作為計算土層初始應力-應變狀態，各斷面分析用地下水位依地質調查報告所述之地下水位進行分析模擬。

3.2.3 結構元件參數

本案結構元件(混凝土鋪面版)參數均使用版元素並採線性彈性模式來模擬。結構元件參數包括斷面積、慣性矩、彈性模數、軸向勁度、撓曲勁度、自重等，其計算方法如下所示。上述結構元件參數考量施工因素於分析時則予以適當折減。

$$EA = \phi \times E \times A$$

$$EI = \phi \times E \times I$$

$$Ec = 1.5 \times 10^6 \times \sqrt{f'c}$$

$$W = A \times \gamma$$

式中，EA：軸向勁度(kN/m)

EI：撓曲勁度(kN-m²/m)

ϕ ：強度折減因數

E：彈性模數(kPa)

E_c ：混凝土彈性模數(kPa)

E_s ：鋼材彈性模數(kPa)； $E_s = 2.1 \times 10^8$ kPa

f'_c ：混凝土抗壓強度(kgf/cm²)

I：慣性矩(m⁴/m)

A：斷面積(m²/m)

W：自重(kN/m/m)

γ ：材料單位重(kN/m³)

3.2.4 路面厚度

式中：

$g.e.$ = 某層之卵石當量厚度(公分)；

c = 某層之凝聚值；

t = 某層之實際厚度；

100 = 卵石之凝聚值；

$$C = \left(\frac{G.E.}{T} \right)^5 \times 100$$

式中：

C = 各層之總凝聚值；

G.E. = 各層卵石當量厚度之總和；

T = 各層之實際厚度之總和；

$$T.I. = 1.35(EWL)^{0.11}$$

式中：

T.I. = 交通量指數

EWL = 22.7KN 輪荷重當量

$$T = \frac{K'(T.I.)(90 - R)}{\sqrt[5]{C}}$$

式中：

T = 上層之各層所需厚度

K' = 0.095，係一常數，根本 22.7KN 輪載重，49N/c 輪胎壓力計算得之

T.I. = 交通量指數

R = 土壤之阻力值

c = 上層土壤之凝聚值。



3.2.5 土層材料參數

依據上述本研究 JW 透水鋪面分析各種不同的土壤情況, JW 鋪面層採 210kgf/cm² 強度之混凝土, 碎石層(級配層) 採表 2.7 粒狀土壤楊氏模量中等強度之礫石; 砂土層、硬化強度粘土層(簡稱粘土層)、軟弱粘土層依表 2.4 各種土壤 ES 的範圍。因此各使用之參數土壤參數設定如下表 3.2.1。

表 3.2.1 JW 鋪面土壤參數設定

	名稱	1.JW 鋪面層 CONCRETE	2.碎石層 GRAVEL	3.砂土層 SAND	4.中等強度黏 土層 Medium CLAY	5.軟弱黏土層 Soft CLAY	單位
材料模型	模型	摩爾-庫倫	摩爾-庫倫	摩爾-庫倫	摩爾-庫倫	摩爾-庫倫	-
材料類型	類型	非多孔	排水的	排水的	不排水的	不排水的	-
水位以上土 體容重	γ_{unsat}	24.0	19	19	18	18	kN/m ³
水位下土體 容重	γ_{sat}	24.0	19	20	19	19	kN/m ³
水平滲透係 數	kx	0.864	0.864	0.864	0	0	m/天
豎向滲透係 數	ky	0.0864	0.864	0.864	0	0	m/天
彈性模量 (常數)	Eref	21,737,065	150,000	30,000	20,000	5,000	kN/m ²
泊松比	v	0.2	0.3	0.3	0.35	0.35	-
內聚力(常 數)	cref	10500	0.01	0.01	40	10	kN/m ²
內摩擦角	φ	0	35	33	0	0	°
剪脹角	ψ	0	0	0	0	0	°
拉伸截斷 抗拉強度		7400	0	0	0	0	kN/m ²
介面強度折 減因數	Rinter	1	1	1	1	1	-

3.2.6 雙輪載重設定

本研究考慮重車 (42.8 噸) 載重進行 JW 鋪面承載力分析。依據中央大學馮天正碩士論文「三維有限元素應用於柔性鋪面之非線性分析」，進行鋪面受載重車輛作用下之結構分析時，由於單軸雙輪及雙軸雙輪重車的前後軸、或前-中後軸，以及重車兩側的距離較遠，通常認為其相互影響較少，為簡化分析時的步驟，一般只考慮局部輪荷重對鋪面之影響。對於典型的重車而言，常以固定的軸間距 122cm(48inch)，及固定的輪間距 34cm(13.5inch)以決定輪荷重的相對位置，如圖 3.2 .1 所示。

輪荷重對鋪面所產生的接觸壓力，分析時常假設為平均分配在胎印上，而輪胎產生的真實胎印，為一近似的橢圓型，通常可以由一個矩型及兩個半圓所組合而成，如圖 2.3.2 所示，可假設長度為 L ，而寬度為 $0.6L$ ，因此接觸面積如式(3.1)所示，亦可以接觸壓力及軸重回算出來。另外，長度 L 則如式(3.2)所示。

$$A_c = \pi(0.3L^2) + (0.4L)(0.6L) = 0.5722L^2 \quad (3.1)$$

所以

$$L = \sqrt{(A_c/0.5722)} \quad (3.2)$$

但由於進行有限元素分析時，此種形狀建立網格模型並不方便，因此，PCA(1984)把輪胎產生的真實胎印，簡化成具有相同面積之矩形，分別假設長度為 $0.8712L$ 及寬度為 $0.6L$ 作為等效之胎印進行分析。如圖 2.3b 所示。而以往許多鋪面設計程式，以及一些二維的有限元素法鋪面分析程式，為簡化分析問題的步驟，常會把胎印以一個等面積的圓代替之，如圖 3.2.3c 所示。

本研究假設雙軸雙輪輪載重 428kN 及接觸胎壓 483kPa(70psi)下胎印等效面積之長度值(依上述公式 2.10 計算)40 cm(如圖 3.3)進行分析。

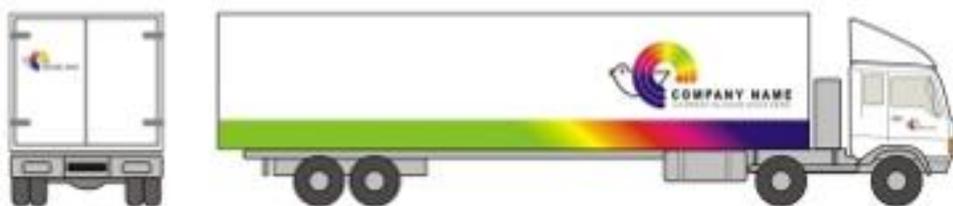
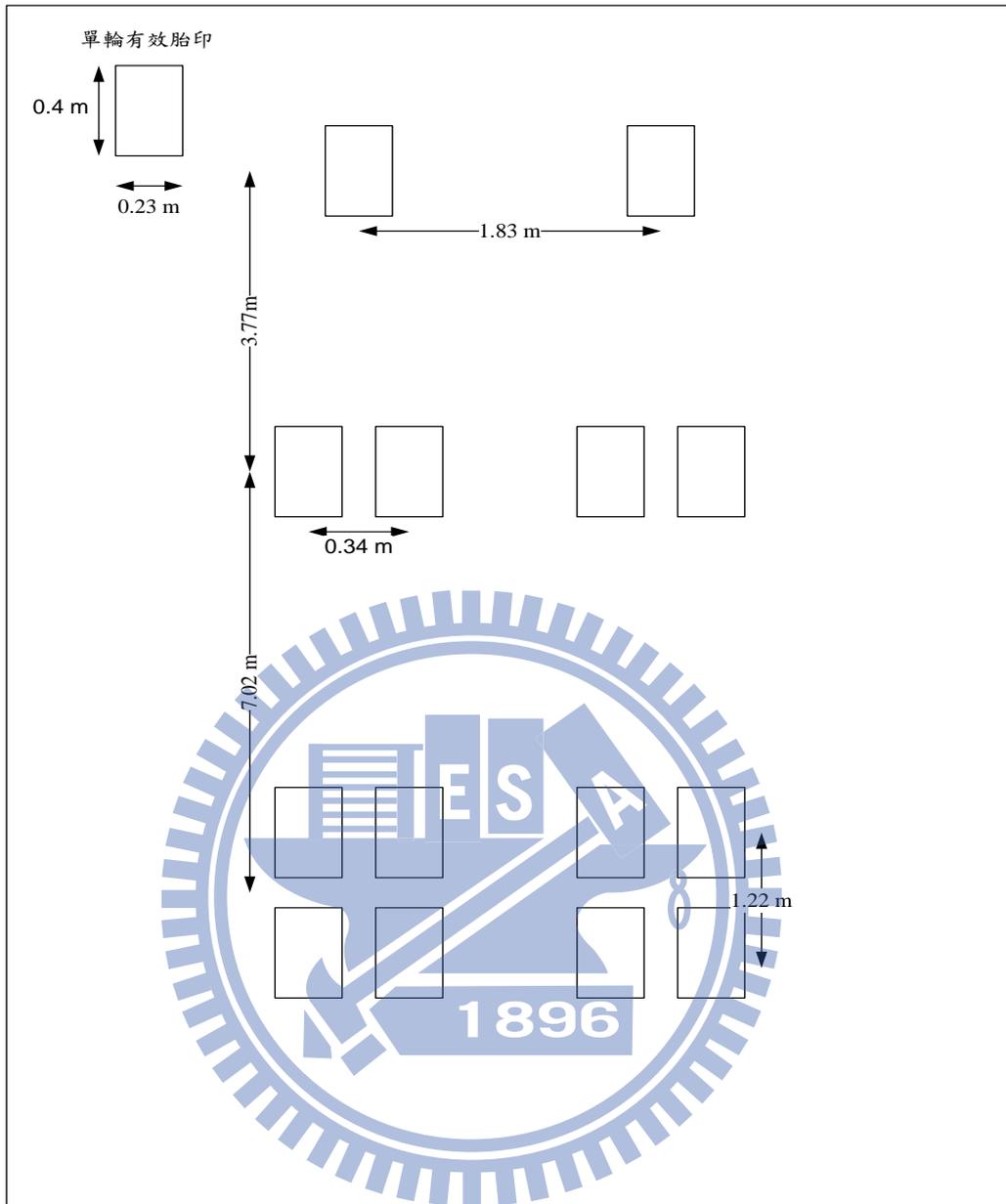


圖 3.3 重車輪胎配置圖

對於單輪荷重的有限元素分析，二維的模型可以利用軸對稱的特性模擬出圓型荷重，但是對於單軸雙輪及雙軸雙輪的荷重而言，並未能符合軸對稱的特性，因此，在進行單軸雙輪及雙軸雙輪的有限元素法分析時，顯然並未能簡化成二維的有限元素分析，只能在三維的有限元素模型才能正確地描述荷重情況。同樣地，考慮問題的對稱性質，

所以雙軸雙輪有限元素模型建立如圖 3.4(a)，而雙軸間之距離定為 122cm(48inch)。而典型載重及土層模型則如圖 3.4(b)所示。

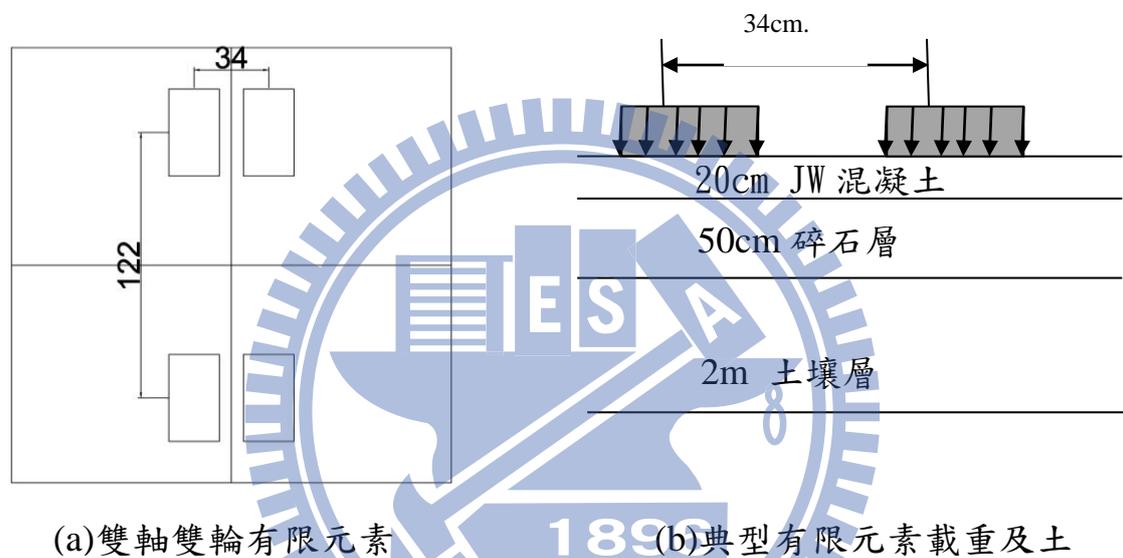


圖 3.4 模擬平、斷面示意圖

3.3 PLAXIS 3D 成果判讀

依 Plaxis 程式分析 JW 混凝土鋪面層為 25cm、20cm、15cm 及 10cm，碎石層為 10cm、20cm、30cm、40cm 及 50cm，與砂土、中等強度黏土及軟弱黏土組合分析其瞬間沉陷量及各層變形量及應變量，成果判讀資料後如附錄二 PLAXIS 成果判讀全車段面資料分析(附表 2.1~2.3)。以 JW25cm、碎石層 50cm 且其土壤為軟弱黏土之總沉陷圖及各層之沉陷量圖(附圖 2.1~2.4)。

PLAXIS 依附錄分析得出 JW25cm 混凝土及碎石 50cm(以下簡稱 JW25G50)其沉陷分佈如附圖 2.7，其中最大沉陷點位置為雙軸雙輪之中心點。若以圖形化則為附圖 2.8 垂直向沉陷分佈圖。由此沉陷曲線可看出，最大沉陷點係位於雙軸雙輪之中心點，而非呈雙駝峰或四駝峰的沉陷曲線，此表示 25cm 混凝土鋪面及 50cm 之碎石層已足夠使鋪面上之載重均勻化，即發揮應力平均分布之功能。若依應力分析，最大為 333.7KN/m^2 ，最小為 -296.6KN/m^2 ，依附圖 2.9 顯示應力大部份已被 JW 層承擔，故傳遞至土壤之應力甚微；依此其應變附圖 2.10 則最大應變位於土壤層。

3.4 影響係數法

Boussinesq (1885)發展點荷重引起地層下的應力增量的相對關係如圖 1，當 P 點荷重作用下，A 點所發展出的應力增量的相對關係，如下式(3.3)所示，而後人將其公式積分為矩形荷重如公式(3.4)(3.5)所示，如圖 3.5.1 所示，方便計算矩形應力所增加的土壤應力。

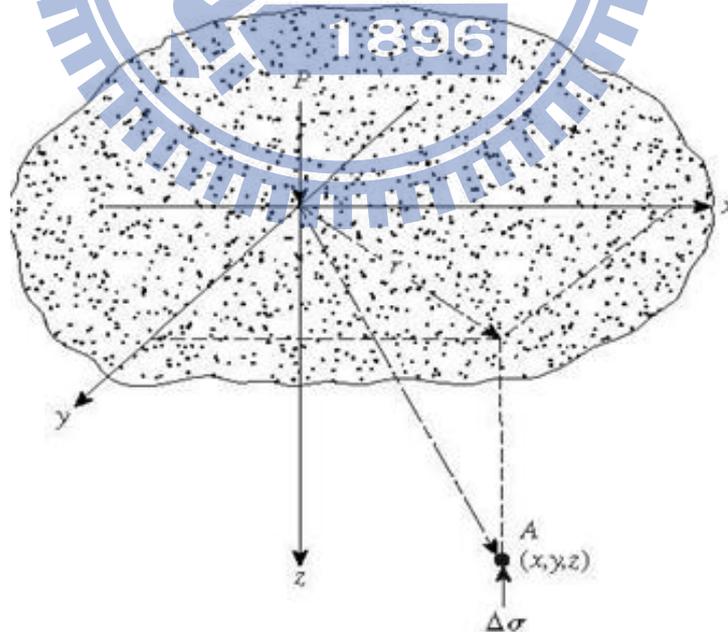


圖 3.5.1 應力增量的相對關係

$$\Delta\sigma = \frac{3P}{2\pi z^2 \left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (3.3)$$

$$d\sigma = \frac{3(q_0 r d\theta dr)}{2\pi z^2 \left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (3.4)$$

$$\Delta\sigma = \int_{y=0}^L \int_{x=0}^B \frac{3q_0(dx dy)z^3}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)} = q_0 I \quad (3.5)$$

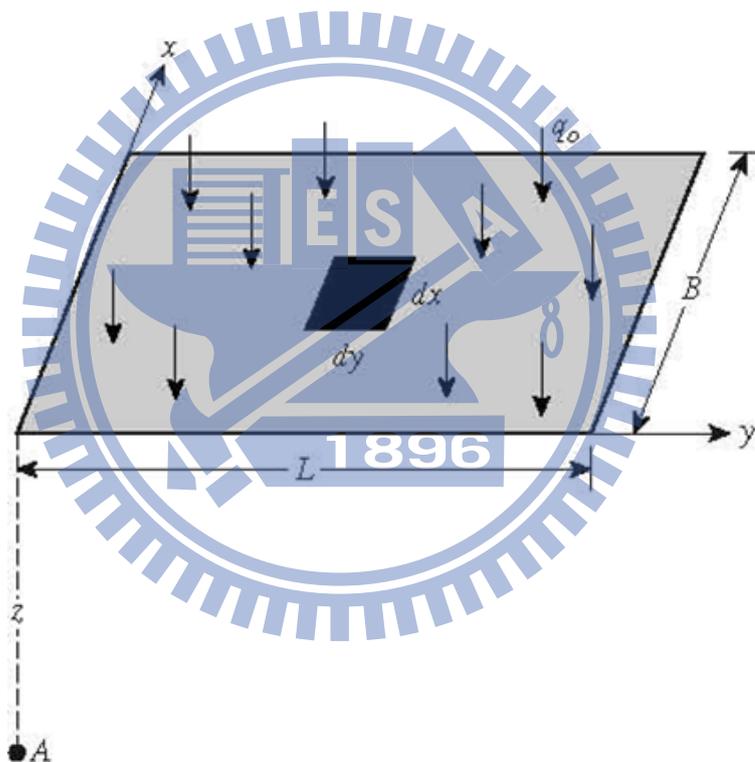


圖 3.5.2 Determination of stress below the corner of a flexible rectangular loading area (Das textbook)

$$I = \frac{1}{4\pi} \times \left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2n^2+1} \times \frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} + \tan^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+1-m^2n^2} \right) \quad (3.6)$$

其中

$$m = \frac{B}{z}, n = \frac{L}{z}$$

沉陷量最大為後車軸部分，為了方便將兩個輪壓視為一個輪壓計算，紅色叉叉部分為預計沉陷量最大的部分，假設在四個輪胎的中間，所以將其分化為四分之一部分計算，如下圖。

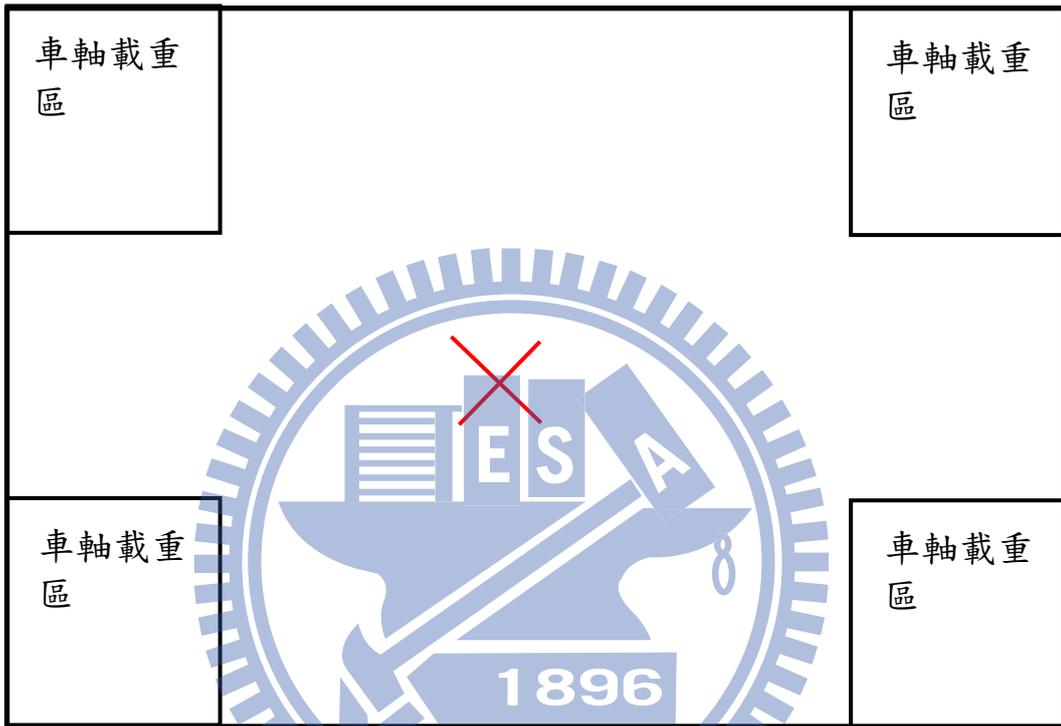


圖 3.5.3 雙軸雙輪載重分佈圖

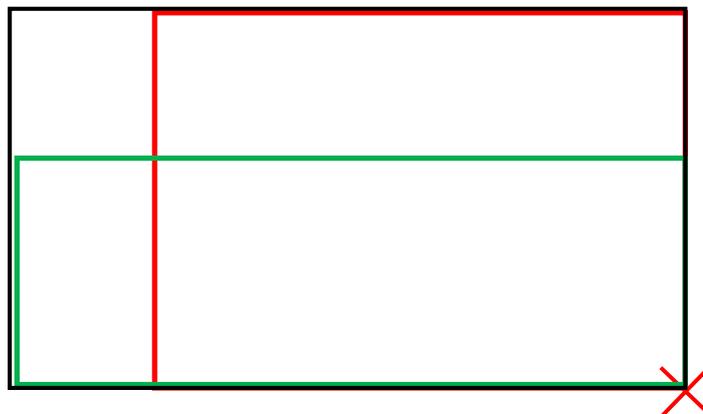


圖 3.5.2 雙軸雙輪載重 1/4 分佈圖

整個區塊定義為 I1

紅色區塊定義為 I2

綠色區塊定義為 I3

紅綠交集區塊定義為 I4

上式所提到的 B 和 L 為這些區塊個別的長和寬

a、b、c、d 為計算 I 的數據

$$a = \frac{1}{4\pi}$$

$$b = \frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1}$$

$$c = \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1}$$

$$d = \tan^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 - m^2n^2}$$

最後

$$I = I1 - I2 - I3 + I4 \quad (3.7)$$

將 I 乘上施加的應力(483kPa)為應力增量，乘上 4 倍就是四個車輪載重對中心所提供的應力增量。

最後用虎克定律求得沉陷量。

$$\varepsilon = \frac{1}{E_s} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu}\right) \Delta\sigma$$

依據上述計算式以 JW=25cm 及碎石=10cm~50cm 在軟弱黏土計算沉陷量,如表 3.5.1。與有限元素數值分析(表 3.5.2)比較之結果，數值分析較為保守。

表 3.5.1 手算分析結果

碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
JW25cm	2.956mm	2.956mm	2.797mm	2.643mm	2.579mm

表 3.5.2 數值分析結果

碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
JW25	2.943mm	2.900mm	2.847mm	2.784mm	2.708mm

3.5 總沉陷量

依據上述 PLAXIS 求得模擬數值僅為瞬間之彈性(或彈塑性)沉陷，但並未考慮其他類型的沈陷，如壓密及潛變。

一般土壤之總沉陷量為

$$\Delta H_T = \Delta H_i + \Delta H_c + \Delta H_s$$

總沉陷量=瞬間沉陷量+壓密沉陷量+二次壓縮沉陷量(即潛變)

黏土之壓密及二次壓縮沉陷量較砂土為大(砂土及碎石幾可忽略)，故若路基土壤為黏土時(尤其是軟弱黏土)，需依土壤力學原理另行考慮壓密及二次壓縮沉陷量。

因為本研究輸入參數計算不考慮壓密沉陷量，及二次壓縮沉陷量(即潛變)，只考慮瞬間沉陷量，瞬間沉陷量包含 JW 混凝土層，碎石層及土壤層之沉陷，稱瞬間合計沉陷量

3.6 土壤密度

此外，若路基為回填土，需考量回填土之濕陷問題。若回填土夯實時之含水量較最佳含水量(O.M.C)為低，即屬乾側夯實，此時雖夯實緊密，亦可能因雨入滲時會破壞原有結構而產生沉陷。此種濕陷之情況尤以粉土(沉泥)及細沙較易發生。故在夯實時應規定含水量需等於或大於最佳含水量(OMC)，且最大乾密度需達標準普羅克達試驗(Standrd Proctor

Test) 所求得最大乾密度之 95% 以上(見圖 3.6)。對於可能發隕陷的土壤，應進行飽和(泡水)實驗，以確認其飽和後之土壤強度及沈陷量均不致受到太大影響。

為瞭解飽和土壤之影響，可採用美國一般剛性路面設計常採用之 PACSE(吳松峯,2005)程式，將路基土壤之飽和參數(如 CBR 或 Modulus of Subgrade Rection) 及重覆載重等資料輸入，即可進行厚度設計。惟鋪面之厚度設計除了需考慮承载力外，碎石層之厚度亦需兼顧蓄水之需求，詳見本報告第四章。

若遇含水量敏感之土壤(如黃土高原之風積土、堅硬且含頁岩的膨脹土(Expansive Soils)或未確實夯實且偏乾側之回填土)，此時可考慮進行土壤改良(以水泥或石灰拌合後重新夯實)、換土或加一層不透水布(Geomembrane)將入滲至碎石層之雨水與其下層之土壤間加以阻隔。

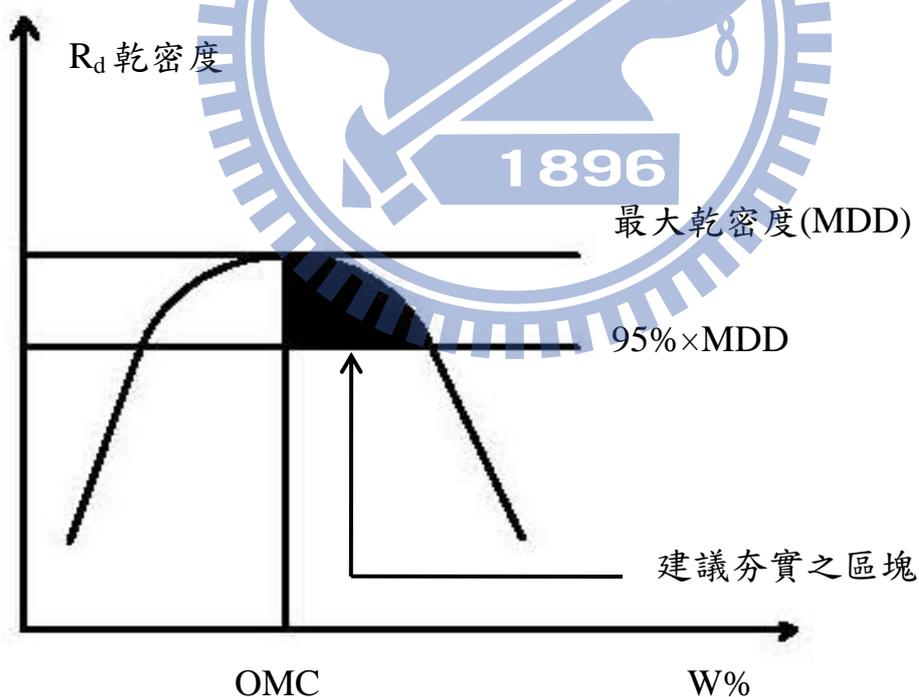


圖 3.6 標準普羅克達試驗

以上圖 3.6 所示

$$r_d > 0.9 \times MDD \quad (3.6.1)$$

$$W\% > OMC \quad (3.6.2)$$

$$R_d = \frac{r_m}{1+W\%} \quad (3.6.3)$$

MDD：最大乾密度

OMC：最佳含水量

W%：含水量

R_d ：最佳乾密度



第四章 結果與討論

4.1 參數建立

4.1.1 道路車輛載重模型之建立

依據圖 3.2.1 車輛載重分布圖，選定以最大車輛 35 噸為為模組，若此種車輛可以承受載重則，其他車種均可適用。目前依車輛載重其沉陷量最大位於拖車後面雙軸雙輪位置，因此分析重點以後軸單邊雙軸雙輪為主詳如下圖 4.1。

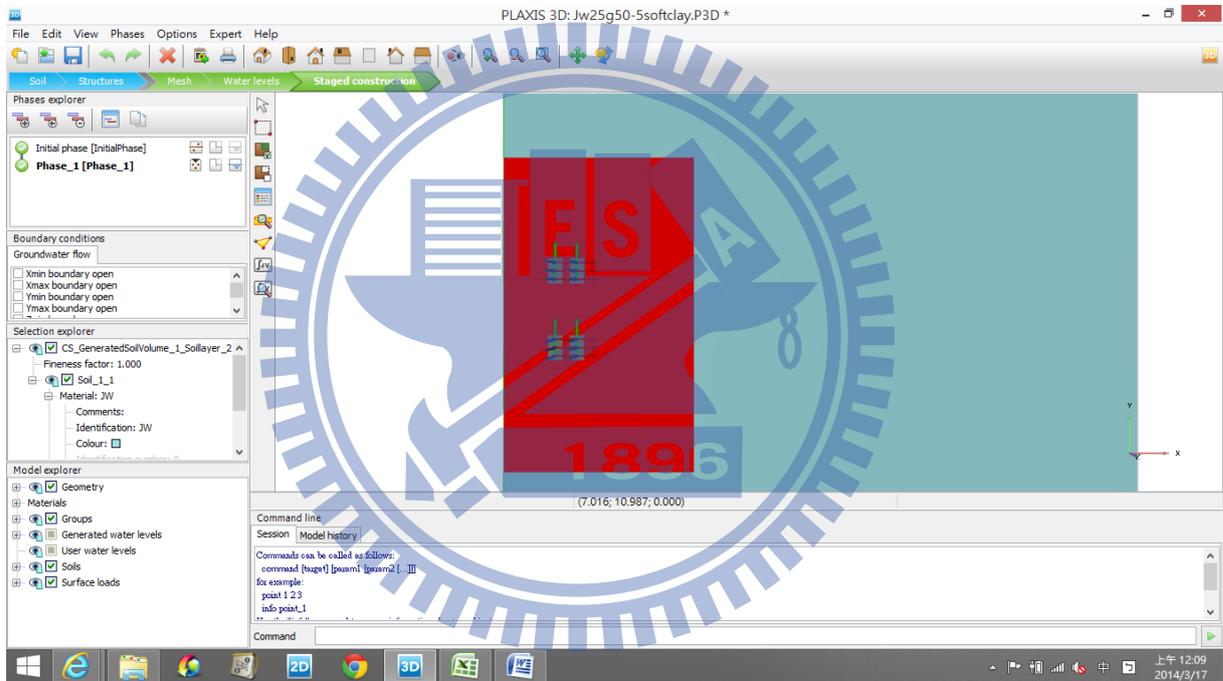


圖 4.1 道路車輛載重模型

4.1.2 選定材料模式

本研究係以模擬 JW25 公分、JW20 公分、JW15 公分至 JW10 公分混凝土鋪面，混凝土強度於 Plaxis 3D 模擬以 210kgf/cm² 為主，另擬於 Plaxis 2D 則模擬 210kgf/cm²、280kgf/cm²、350kgf/cm² 及 1980kgf/cm² 四種混凝土強度，以探討混凝土對鋪面之影響(詳附錄一)，碎石級配厚度為 50 公分、40 公分、30 公分、20 公分至 10 公分及下層為砂土層，中

等強度黏土層與軟弱黏土，JW 鋪面至土壤總厚度 5 公尺為分析原則，詳如下圖 4.2。

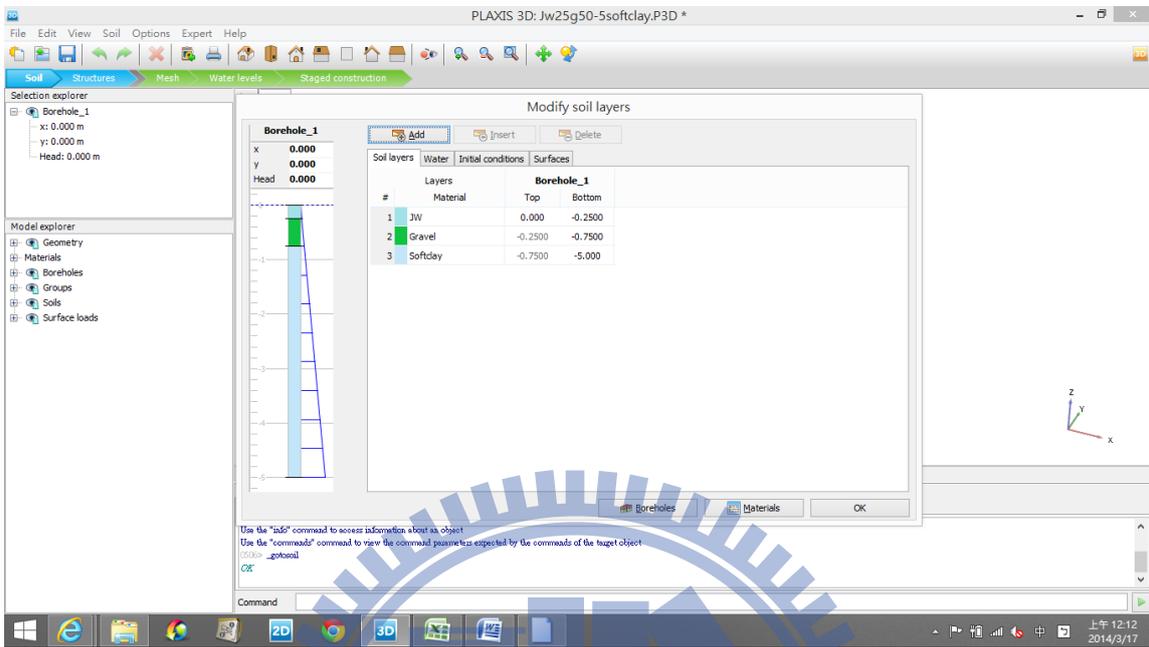


圖 4.2 各層材料組成厚度

各層材料參數設定後，需檢查其模擬試驗室參數圖 4.3 是否相同，如下圖 4.4 中 210kgf/cm^2 混凝土單壓試驗及圖 4.5 軟弱黏土壓密試驗。依顯示土壤達達 2%，則其土體即達破壞。



圖 4.3 實驗室 210kgf/cm^2 混凝土單壓試驗

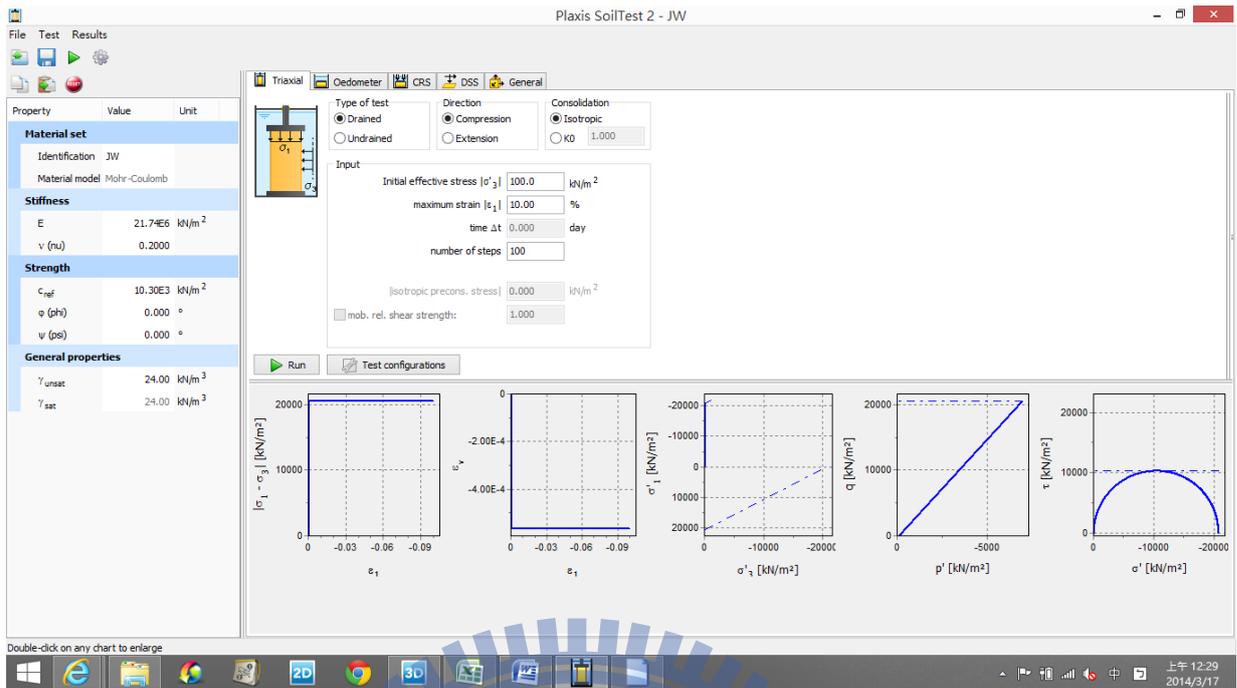


圖 4.4 Plaxis 210kgf/cm² 混凝土單壓試驗

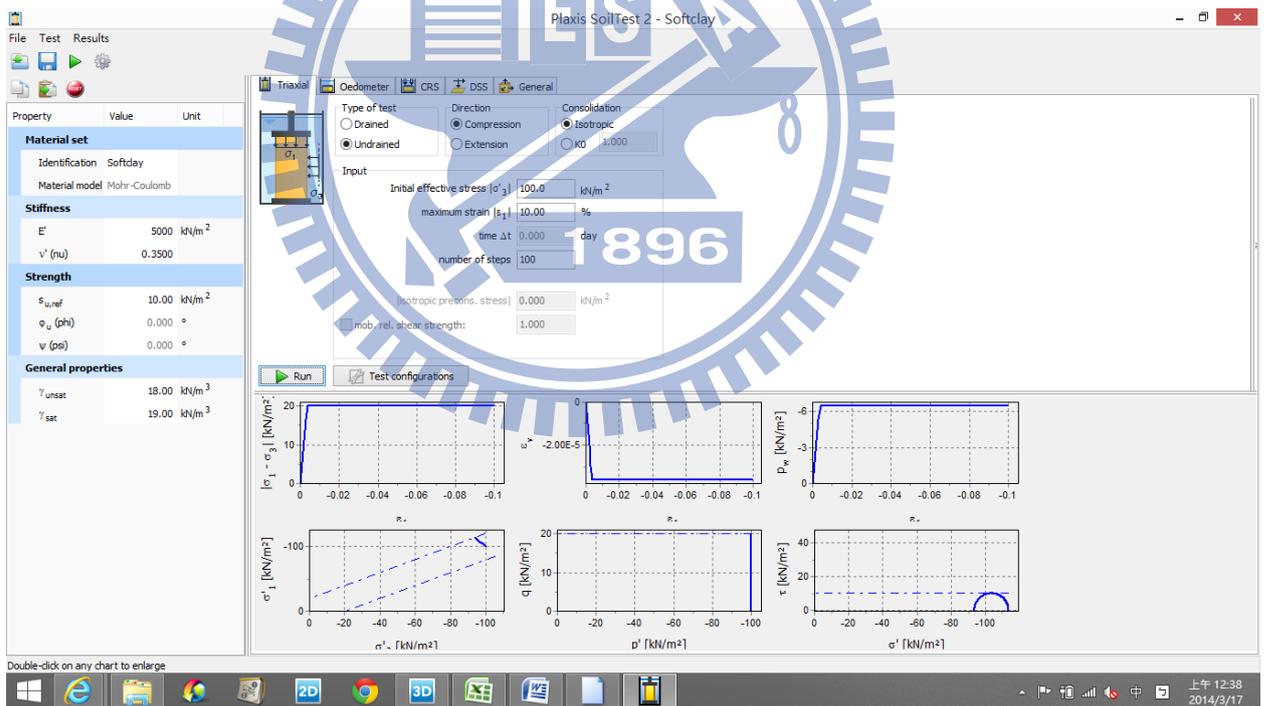


圖 4.5 軟弱黏土壓密(排水)試驗

4.1.3 設定邊界條件

本研究模擬邊界，全車考量(如圖 4.6)以對等方式模擬以六車道含人行道之 30 公尺路寬加一倍影響範圍，而取 60 公尺(寬) \times 100 公尺(長) \times 5 公尺(深)模擬其沉陷量(如附錄二數據成果判讀之數據)。因全車考量其計算時間冗長，後續採後軸單邊雙軸雙輪(如圖 4.7)以 9 公尺 \times 14 公尺 \times 5 公尺之邊界條件，來考量沉陷之變化，其計算時間減少約 20 倍，且沉陷量差距極微，而後軸單邊雙軸雙輪其數據稍為大些，及邊界深度影響範圍最小，因此後續以採後軸單邊雙軸雙輪為主。

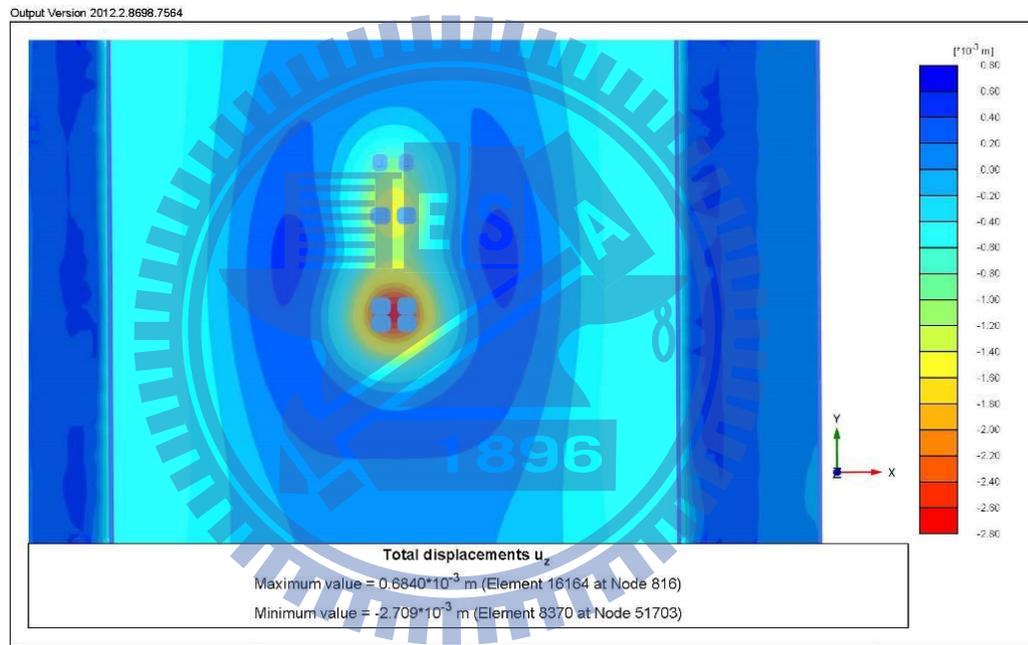


圖 4.6 全車考量沉陷量

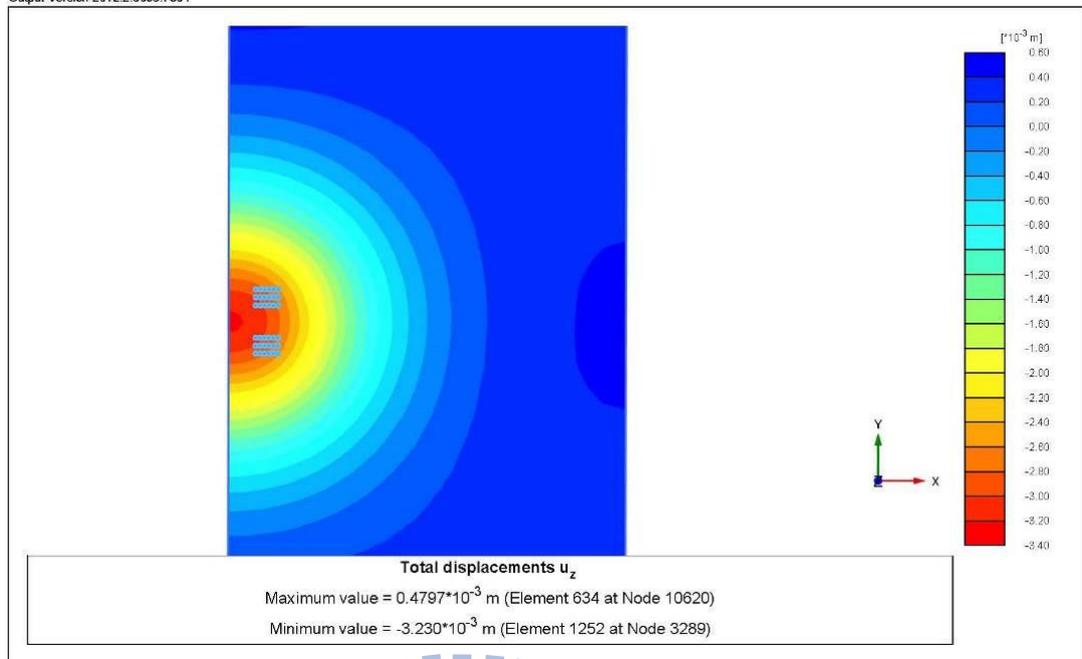


圖 4.7 後軸單邊雙軸雙輪

4.2 模擬成果判讀

4.2.1 沉陷量成果判讀

本研究以後軸單邊雙軸雙輪以 9 公尺*14 公尺*5 公尺為範圍，依 Plaxis 程式模擬分析 JW 透水鋪面混凝土鋪面層為 25cm、20cm、15cm 及 10cm，碎石層為 10cm、20cm、30cm、40cm 及 50cm，與砂土、一般黏土及軟弱黏土組合(如表 3.2.1 土壤參數)分析其瞬間沉陷量及各層變形量及應變量，成果判讀後如下表 4.1~4.3。下圖 4.8 係以 JW25cm、碎石層 50cm(以下以 JW25G50 標示)，其土壤為軟弱黏土之瞬間沉陷量圖。

表 4.1 成果判讀軟弱黏土模擬 9 公尺*14 公尺*5 公尺瞬間沉陷量

軟弱黏土(Softclay)						
Softclay	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
Jw25	1.JW(mm)	0.002	0.003	0.003	0.003	0.002
	2.碎石層(mm)	0.020	0.051	0.099	0.151	0.220
	5.軟弱黏土層(mm)	3.453	3.376	3.282	3.159	3.008
	瞬間合計沉陷量(mm)	3.475	3.430	3.384	3.313	3.230
Jw20	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	1.JW(mm)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
	2.碎石層(mm)	0.027	0.074	0.141	0.215	0.313
	5.軟弱黏土層(mm)	4.632	4.543	4.411	4.255	4.044
	瞬間合計沉陷量(mm)	4.662	4.620	4.555	4.473	4.360
Jw15	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	1.JW(mm)	0.003	0.003	0.003	0.004	0.003
	2.碎石層(mm)	0.038	0.109	0.212	0.333	0.454
	5.軟弱黏土層(mm)	6.506	6.379	6.185	5.969	5.706
	瞬間合計沉陷量(mm)	6.547	6.491	6.400	6.306	6.163
Jw10	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	1.JW(mm)	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003
	2.碎石層(mm)	0.044	0.151	0.311	0.456	0.618
	5 軟弱黏土層(mm)	9.065	8.878	8.639	8.381	8.086
	瞬間合計沉陷量(mm)	9.112	9.032	8.952	8.840	8.707

表 4.2 成果判讀中等強度黏土模擬 9 公尺*14 公尺*5 公尺瞬間沉陷量

中等強度黏土(Medium clay)						
Medium clay	碎石厚度	10	20	30	40	50
Jw25	1.JW(mm)	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002
	2.碎石層(mm)	0.012	0.029	0.055	0.084	0.116
	4.中等強度黏土層(mm)	1.498	1.463	1.420	1.364	1.301
	瞬間合計沉陷量(mm)	1.511	1.494	1.477	1.449	1.419
	Jw20	碎石厚度	10	20	30	40
Jw20	1.JW(mm)	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002
	2.碎石層(mm)	0.013	0.034	0.065	0.102	0.138
	4.中等強度黏土層(mm)	1.847	1.813	1.760	1.696	1.625
	瞬間合計沉陷量(mm)	1.862	1.849	1.827	1.799	1.765
	Jw15	碎石厚度	10	20	30	40
1.JW(mm)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.碎石層(mm)		0.014	0.038	0.073	0.114	0.156
4.中等強度黏土層(mm)		2.265	2.227	2.170	2.108	2.032
瞬間合計沉陷量(mm)		2.279	2.265	2.243	2.222	2.188
Jw10	碎石厚度	10	20	30	40	50
	1.JW(mm)	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
	2.碎石層(mm)	0.029	0.070	0.115	0.185	0.235
	4.中等強度黏土層(mm)	2.717	2.662	2.609	2.525	2.456
	瞬間合計沉陷量(mm)	2.761	2.747	2.739	2.725	2.706

表 4.3 成果判讀中等強度黏土模擬 9 公尺*14 公尺*5 公尺瞬間沉陷量

一般砂土(Sand)						
Sand	碎石厚度	10	20	30	40	50
Jw25	1.JW(mm)	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002
	2.碎石層(mm)	0.009	0.020	0.035	0.050	0.068
	3.砂土層(mm)	1.317	1.283	1.245	1.205	1.160
	瞬間合計沉陷量(mm)	1.327	1.305	1.281	1.256	1.230
Jw20	碎石厚度	10	20	30	40	50
	1.JW(mm)	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
	2.碎石層(mm)	0.008	0.021	0.036	0.051	0.069
	3.砂土層(mm)	1.574	1.537	1.495	1.451	1.401
	瞬間合計沉陷量(mm)	1.584	1.559	1.532	1.503	1.471
Jw15	碎石厚度	10	20	30	40	50
	1.JW(mm)	0.004	0.004	0.004	0.005	0.004
	2.碎石層(mm)	0.010	0.024	0.042	0.062	0.082
	3.砂土層(mm)	1.895	1.857	1.814	1.766	1.715
	瞬間合計沉陷量(mm)	1.909	1.885	1.860	1.833	1.801
Jw10	碎石厚度	10	20	30	40	50
	1.JW(mm)	0.009	0.009	0.008	0.009	0.009
	2.碎石層(mm)	0.015	0.039	0.070	0.101	0.171
	3.砂土層(mm)	2.324	2.279	2.234	2.187	2.098
	瞬間合計沉陷量(mm)	2.348	2.327	2.312	2.297	2.278

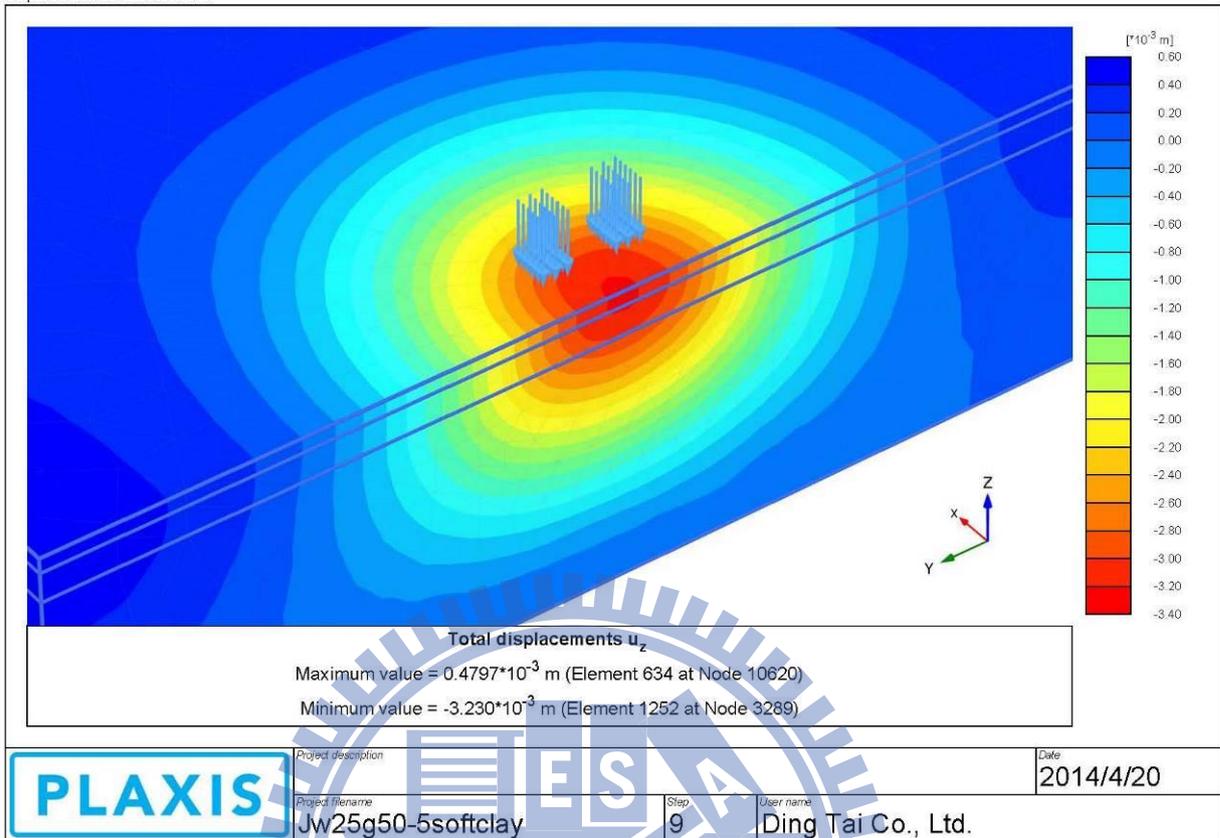


圖 4.8 JW25G50 軟弱黏土之瞬間沉陷量

由圖 4.8 右下角的向量，沿著箭頭的方向為正，PLAXIS 依照卡笛兒座標軸來定義，如 Z 軸為向上為正，向下為負，由右邊的圖例可以得知，偏紅色的值為負的，代表偏紅色的位置是向下沉陷的，偏藍色的值為正的，代表其向下沉陷量的值並不是那麼大，或者是向上隆起的，因此可以看出 Z 方向的沉陷主要集中在四輪的中間下方，可對應 3.4 章節之理論。

依上列分析得出在軟弱黏土中 JW25cm 混凝土碎石 50cm(JW25G50) 其最大瞬間合計沉陷量為 3.23mm，若單以 JW 層之沉陷量為 0.002mm，碎石層之沉陷量為 0.22mm，軟弱黏土層之沉陷量為 3.08mm，若以圖形化則為下圖 4.9 各層沉陷量。

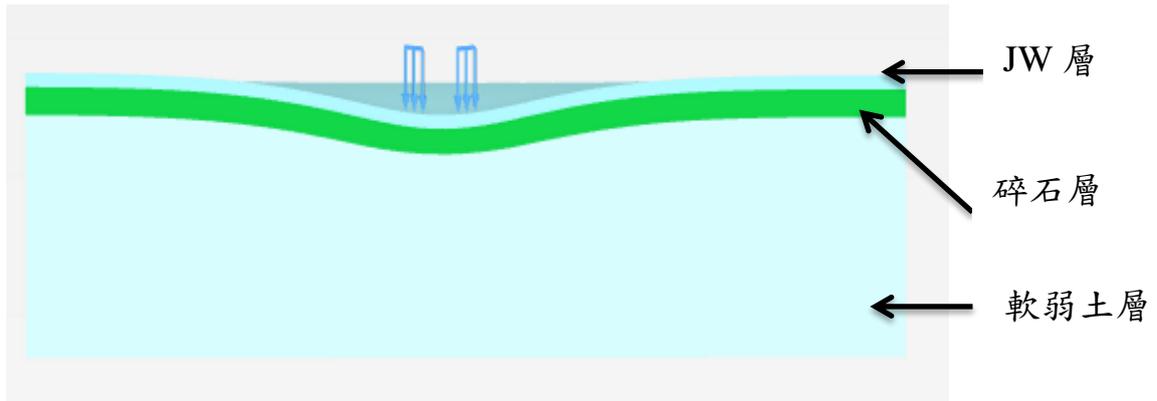


圖 4.9 各層沉陷量

依表 4.1 成果判讀 JW25cm 至 JW10cm 混凝土與碎石 50cm 至 10cm，搭配軟弱黏土(Soft clay)、中等強度黏土(Medium clay)及一般砂土(Sand)三種土壤之數據轉化如下圖 4.10，其中砂土因其 E 值較高所以其沉陷量較低，因此後續成果討論重點為軟弱黏土(Soft clay)及中等強度黏土(Medium clay)為主。

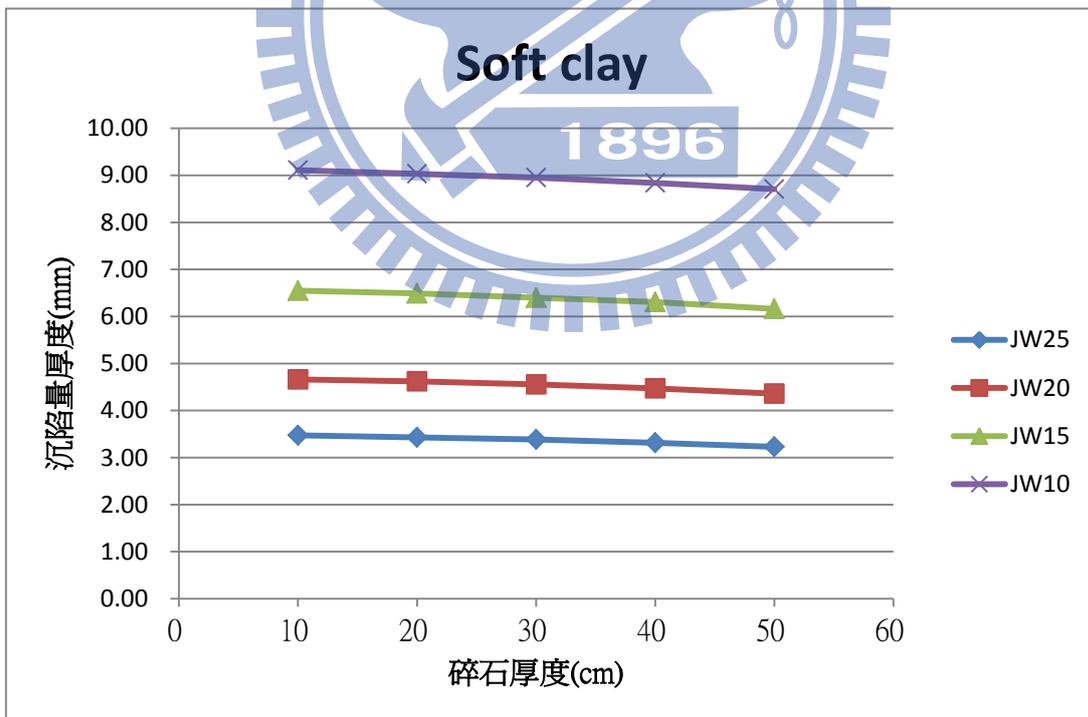


圖 4.10.1 JW 與碎石搭配軟弱黏土層之沉陷量

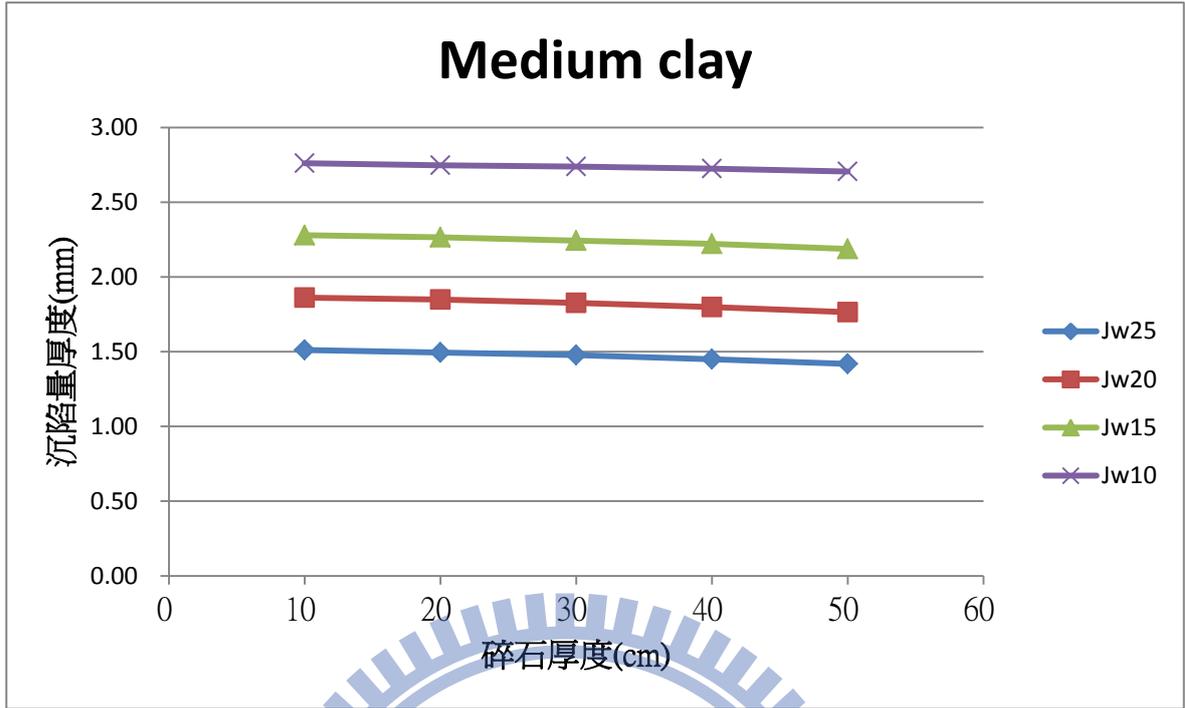


圖 4.10.2 JW 與碎石搭配中等強度黏土之沉陷量

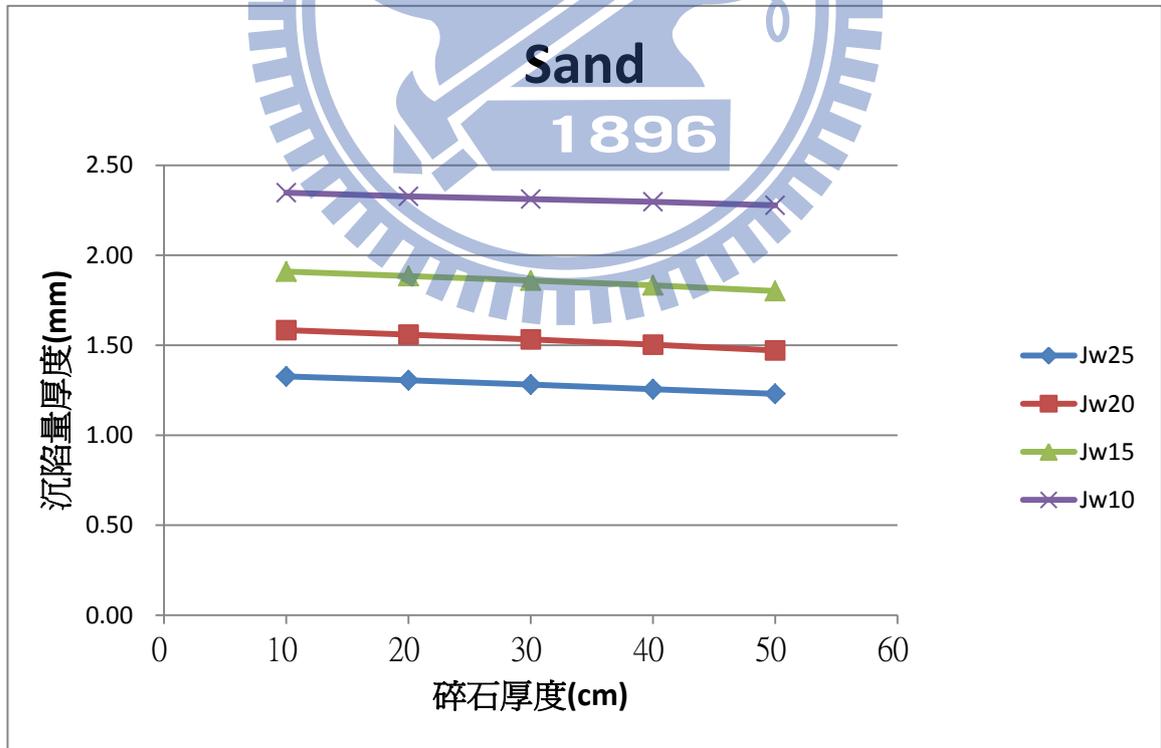


圖 4.10.3 JW 與碎石搭配砂土層之沉陷量

依 JW25cm 混凝土及軟弱黏土(Soft clay)，搭配碎石 10cm 至 50cm (以下採用 JW25 Soft clay 表示)，其圖形表示如圖 4.11 JW25 Soft clay 各層沉陷量趨勢圖，其中 JW 層沉陷量均在 0.002mm 至 0.003mm，表示 JW25cm 混凝土厚度強度足以承擔上層壓力。碎石厚度越厚沉陷量越大，但沉陷量均在 0.02 至 0.22mm，依其沉陷值均很小可視為自重之沉陷。軟弱黏土(Soft clay)依碎石厚度越厚則沉陷量越小，可表示因上層之碎石厚度及頂層 JW 關係，承受大部分載重原因，詳圖 4.12 JW25G50 Softclay 沉陷量圖。

圖 4.13 為 Y 方向的位移圖，如上所述，以此方向觀察得到紅色部分為向左位移，藍色為向右位移，依照卡式座標來定義車輪前進方向之沉陷量受較大，則車輪後方則產生向上隆起。

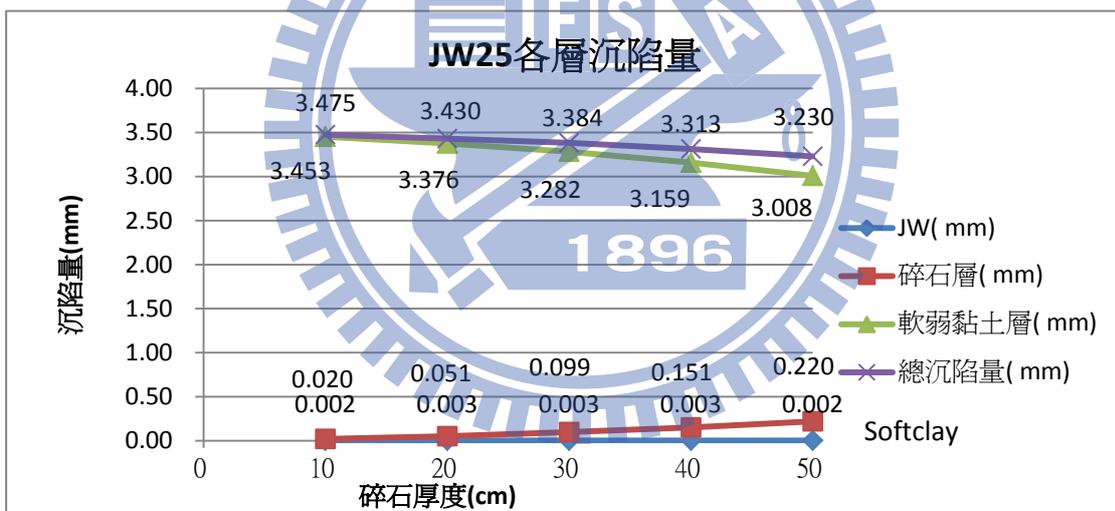


圖 4.11 JW25 Soft clay 各層沉陷量趨勢圖

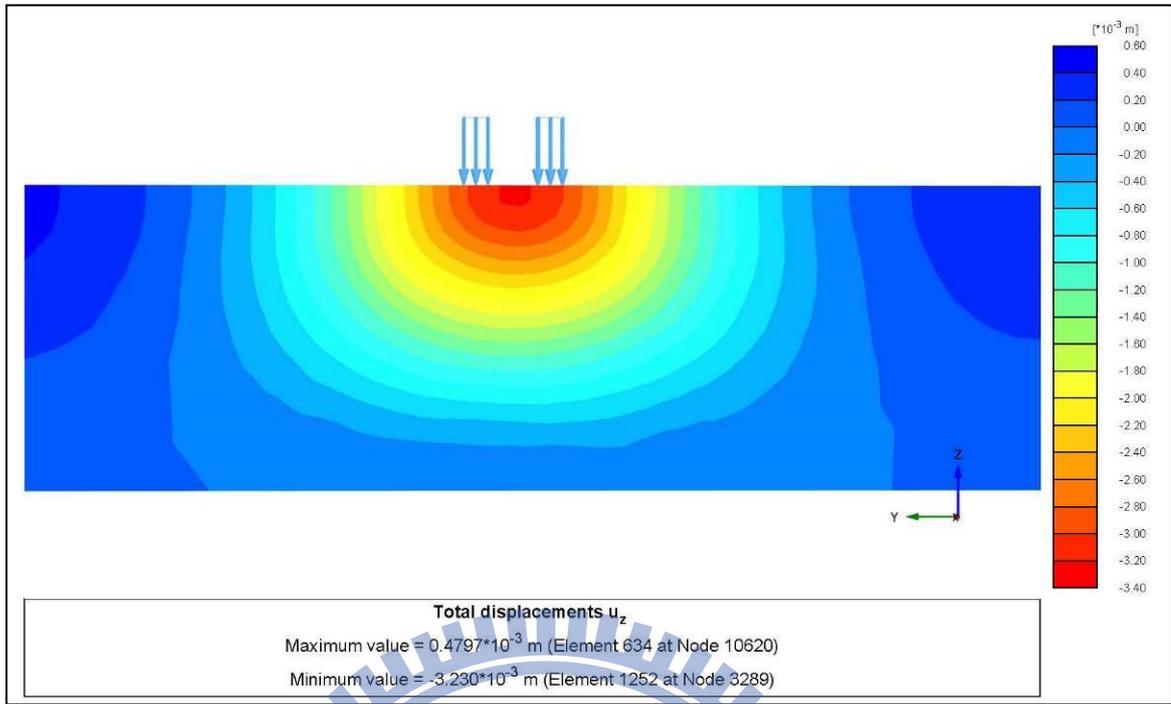


圖 4.12 JW25G50 Soft clay 沉陷量圖

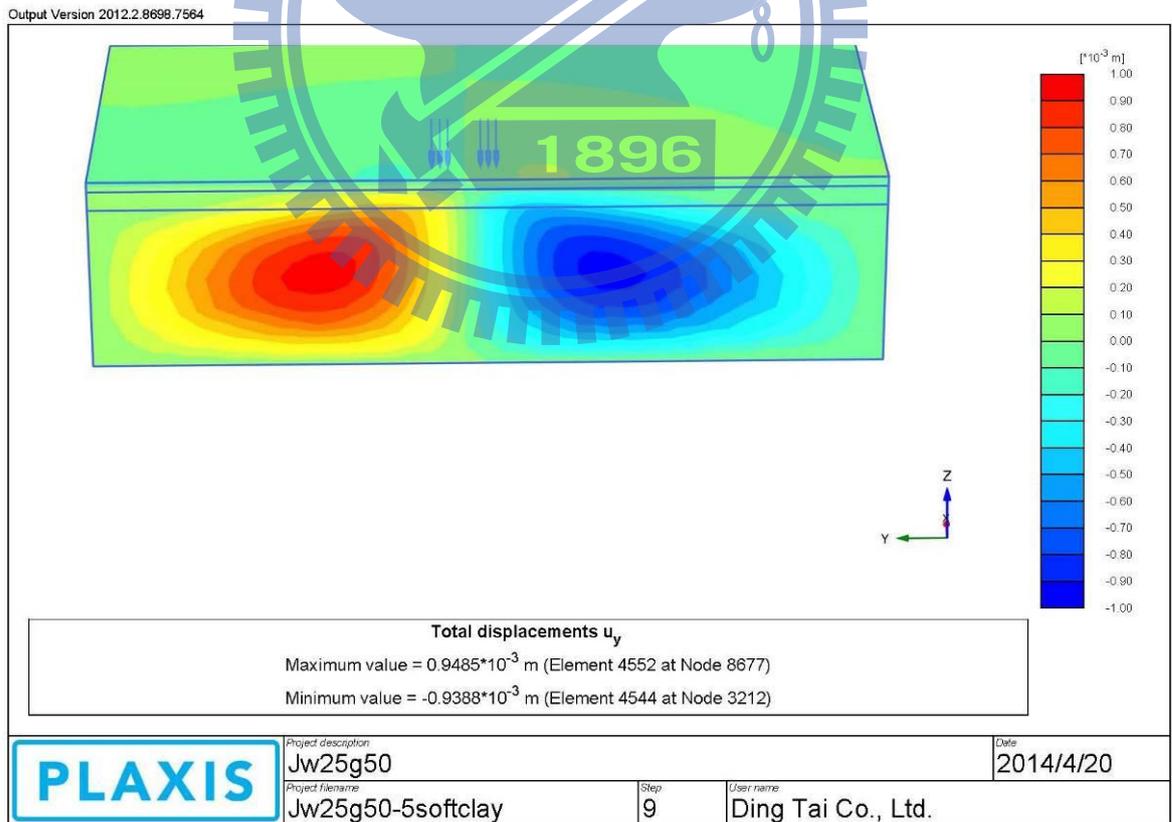


圖 4.13 JW25G50 Soft clay Y 向沉陷量圖

4.2.2 壓力及張力成果判讀

依據 Plaxis 模擬 9 公尺*14 公尺*5 公尺，成果判讀垂直 Y 方向之壓力及張力資料如下表 4.4.1~4.4.3 及圖 4.14.1~14.3。依圖 4.15 壓力及張力圖，對於應力正負值與方向並無直接關係，負值所代表的是壓力，正值代表的是張力，如圖所示可以發現，在輪重正下方為壓力，而在 JW 版為藍色即張力部分。

依據表 4.4.1~4.4.3 資料判讀各種土壤於 JW 混凝土鋪面厚度 20 公分以上，碎石厚度 10 公分以上，在各種土壤其張力強度均在 360 kN/m^2 以下，未超過標準值 $483(\text{kN/m}^2)$ ，此係代表 JW 混凝土鋪面厚度 20 公分足以承載胎壓 $483(\text{kN/m}^2)$ 之卡車，且碎石厚度不影響 JW 混凝土鋪面厚度大小，其碎石厚度係以儲存水量而定。

表 4.4.1 擬軟弱黏土(Soft Clay)

Soft clay	碎石				
jw10	10	20	30	40	50
張力(kN/m^2)	2365	2367	2357	2337	2346
壓力(kN/m^2)	3500	3490	3443	3403	3471
jw15	10	20	30	40	50
張力(kN/m^2)	943.6	942.6	934.4	919.2	908.6
壓力(kN/m^2)	1334	1325	1307	1286	1281
jw20	10	20	30	40	50
張力(kN/m^2)	360.1	360.4	358.8	354	349.1
壓力(kN/m^2)	648.9	646	644.9	646.4	642.8
jw25	10	20	30	40	50
張力(kN/m^2)	165.5	165.9	165.4	164.4	163.4
壓力(kN/m^2)	528.8	528	527.4	528.3	527.9
標準值(kN/m^2)	483	483	483	483	483

表 4.4.2 中等強度黏土(Soft Clay)Y 向壓力及張力

Medium clay	碎石				
jw10	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)	1554	1587	1593	1585	1589
壓力(kN/m ²)	2182	2201	2198	2180	2180
jw15	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)	609.9	607.7	606.4	605.4	605.2
壓力(kN/m ²)	871.1	874.5	870.3	868.5	865.5
jw20	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)	279.5	279.1	277.4	276.8	275.8
壓力(kN/m ²)	610.5	609.2	609	608.1	606.2
jw25	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)	137.2	136.8	136.4	135.6	135.7
壓力(kN/m ²)	518.6	517.9	517.4	516.8	515.9
標準值(kN/m ²)	483	483	483	483	483

表 4.4.3 一般砂土(Sand)Y 向壓力及張力

Sand	碎石				
jw10	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)	1479	1508	1531	1534	1539
壓力(kN/m ²)	2094	2101	2117	2108	2128
jw15	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)	579.4	582.3	583.6	581.4	578
壓力(kN/m ²)	826.9	829.3	830.8	828.4	821
jw20	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)	266.1	266.5	265.7	264.7	263.7
壓力(kN/m ²)	603	602.6	602.2	604.3	604.1
jw25	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)	129.2	129	128.9	128.2	127.7
壓力(kN/m ²)	514.6	514.1	513.7	514.6	514.5
標準值(kN/m ²)	483	483	483	483	483

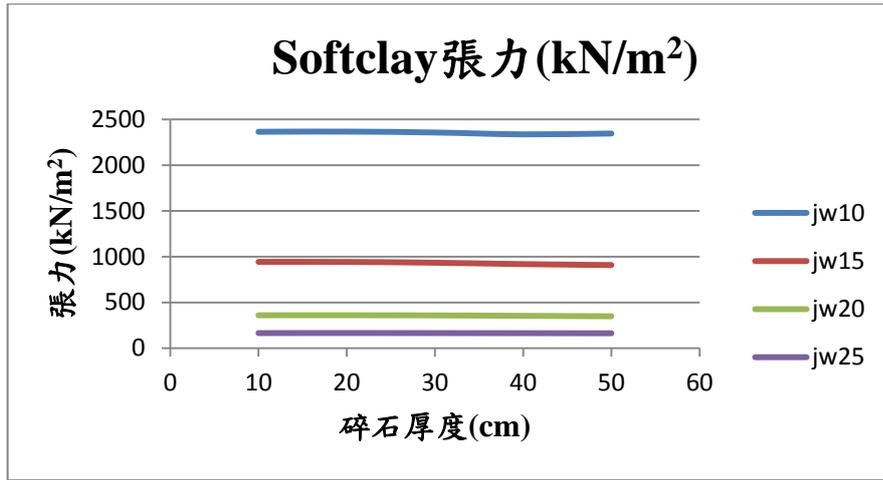


圖 4.14.1 軟弱黏土(Soft Clay)Y 向張力圖

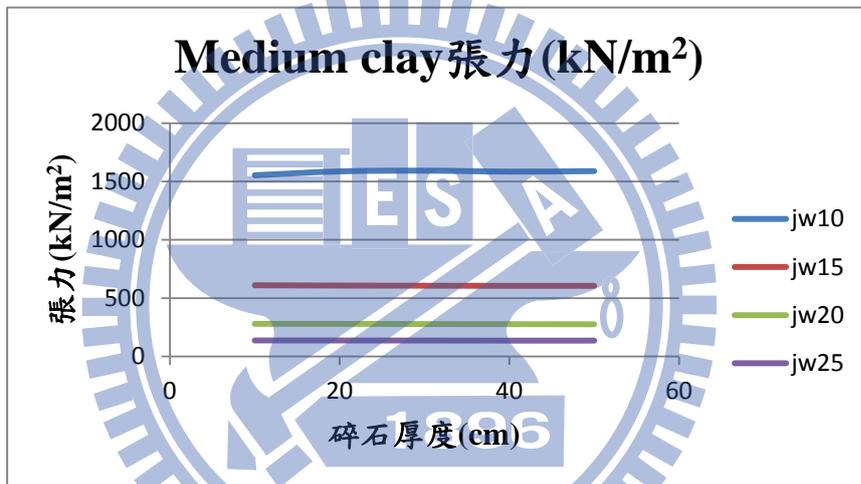


圖 4.14.2 中等強度黏土(Soft Clay)Y 向張力圖

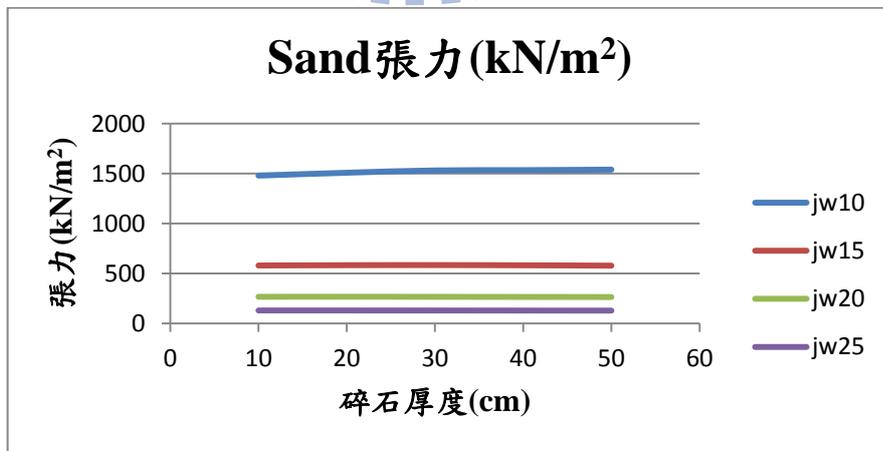


圖 4.14.3 一般砂土(Sand)Y 向張力圖



圖 4.15 軟弱黏土(Soft Clay)Y 向壓力及張力圖

4.2.3 剪力成果判讀

依據 Plaxis 模擬 9 公尺*14 公尺*5 公尺之剪力，以 483KN/m² 為標準，成果判讀如下表 4.5.1~4.5.3 數據及圖 4.18.1~18.3。依圖 4.17 剪力圖，對於應力正負值與方向並無直接關係，其剪力表示方式為正值為張力，負值為壓力，在剪力中張力剪應變。

依成果判讀之剪力資料表顯示，在底層為軟弱黏土，其所有壓力及張力均超過標準 483KN/m²，則顯示 JW 工法透水鋪面混凝土厚度都破壞；而底層中等強度黏土層，在混凝土厚度 25 公分，其最大壓力為 461.5KN/m²，張力為 438KN/m²，其餘厚度在 25 公分以下均在標準以上；另底層為砂土層時，混凝土厚度 25 公分，其最大壓力為 386.7KN/m²，張力為 418.2KN/m²，其餘厚度在 25 公分以下均在標準以上；依上述 JW

透水鋪面於軟弱黏土層施作時，應先做土壤改良，使其承载力達到中等強度黏土層強度以上。

表 4.5.1 軟弱黏土(Soft Clay) (側向力 XY 向)剪力

Soft clay	碎石				
jw10	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	1714	1701	1689	1672	1673
壓力(kN/m ²)(負值)	1711	1714	1701	1693	1687
jw15	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	1263	1254	1240	1223	1205
壓力(kN/m ²)(負值)	1298	1294	1285	1273	1263
jw20	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	818.7	813.5	807.4	799.7	788.2
壓力(kN/m ²)(負值)	849.7	846.9	844	840.3	830.9
jw25	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	588.7	585.9	583	579.9	575.8
壓力(kN/m ²)(負值)	602.2	597.3	592.2	585.4	582.3
標準值	483	483	483	483	483

表 4.5.1 中等強度黏土(Medium clay) (側向力 XY 向)剪力

Medium clay	碎石				
jw10	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	798	806.4	813.2	815.1	820.2
壓力(kN/m ²)(負值)	902.6	916.8	921.8	927.6	933
jw15	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	700.9	701.7	699.9	698.7	698.2
壓力(kN/m ²)(負值)	787	789.6	789.5	790.3	790
jw20	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	558	556.8	553.9	551.2	548.6
壓力(kN/m ²)(負值)	606.2	606.3	604.9	603.6	601.5
jw25	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	438	435.1	433.2	431.1	427.6
壓力(kN/m ²)(負值)	461.5	460.7	459.5	458.1	455.6
標準值	483	483	483	483	483

表 4.5.1 一般砂土(Sand) (側向力 XY 向)剪力

Sand	碎石				
jw10	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	712.5	724.7	734.9	744	748.7
壓力(kN/m ²)(負值)	828	838.2	845.6	853.9	861.5
jw15	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	620	623.8	625.5	625.2	621.2
壓力(kN/m ²)(負值)	715.4	719.4	721.2	720.8	717.7
jw20	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	491.9	491.8	489.5	486.6	483
壓力(kN/m ²)(負值)	549.1	549.2	547	544.5	540
jw25	10	20	30	40	50
張力(kN/m ²)(正值)	386.7	385.3	382.9	380.6	377.9
壓力(kN/m ²)(負值)	418.2	417	415.2	413	410.1
標準值	483	483	483	483	483

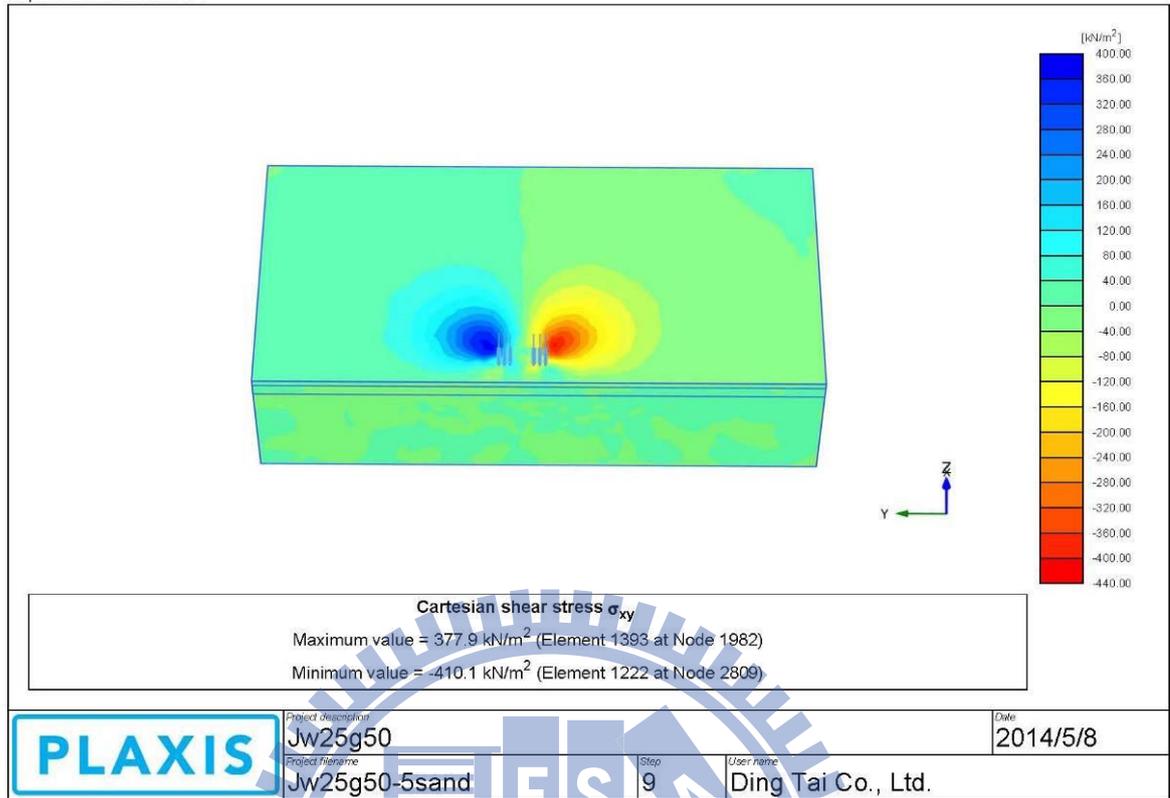


圖 4.16 一般砂土(Sand) (側向力 XY 向)剪力圖

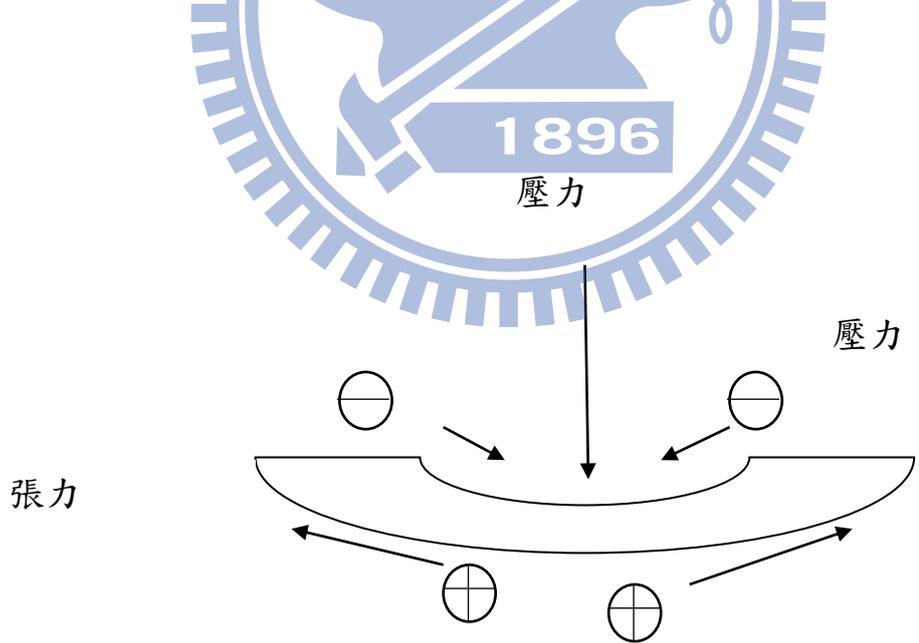


圖 4.17 剪力圖

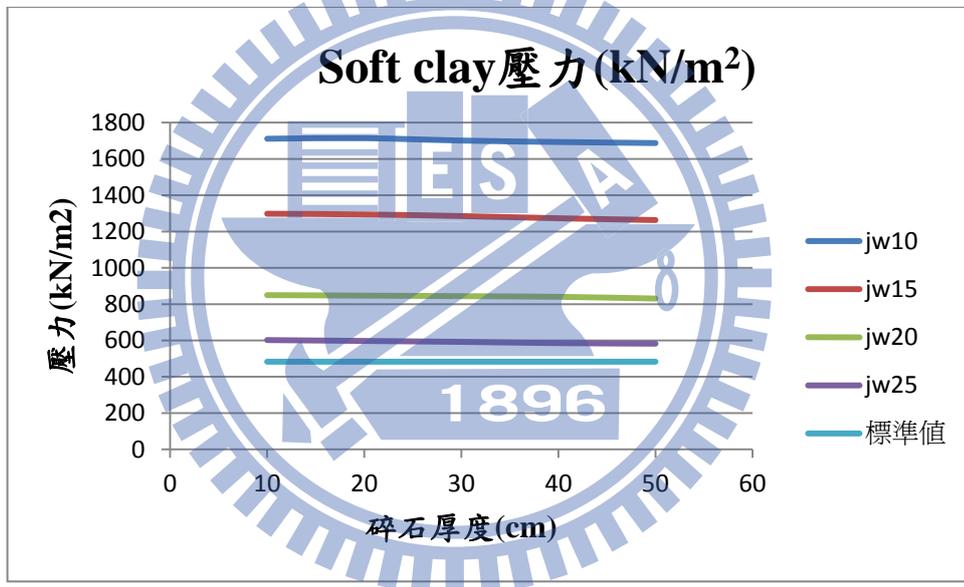
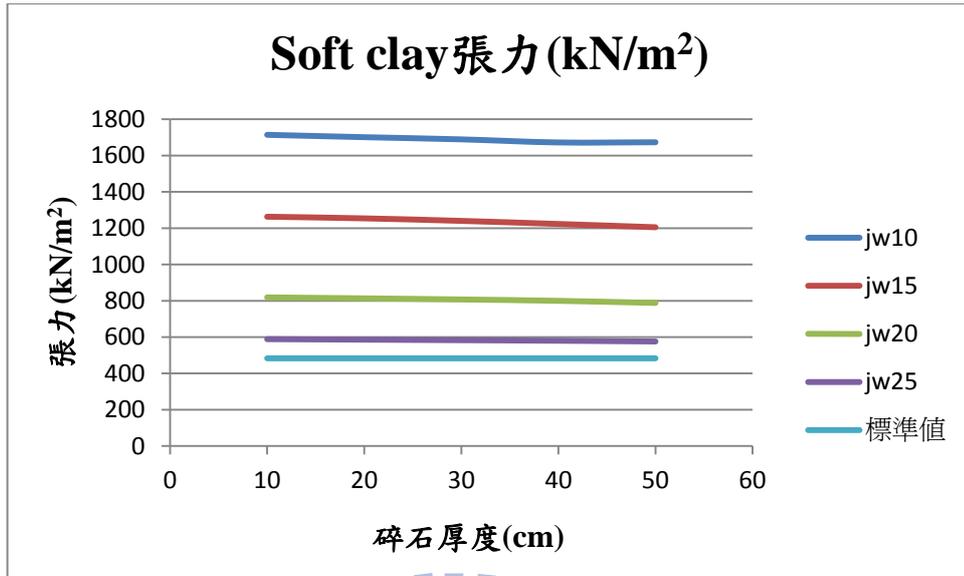


圖 4.18-1 軟弱黏土(Soft Clay)張力及壓力圖

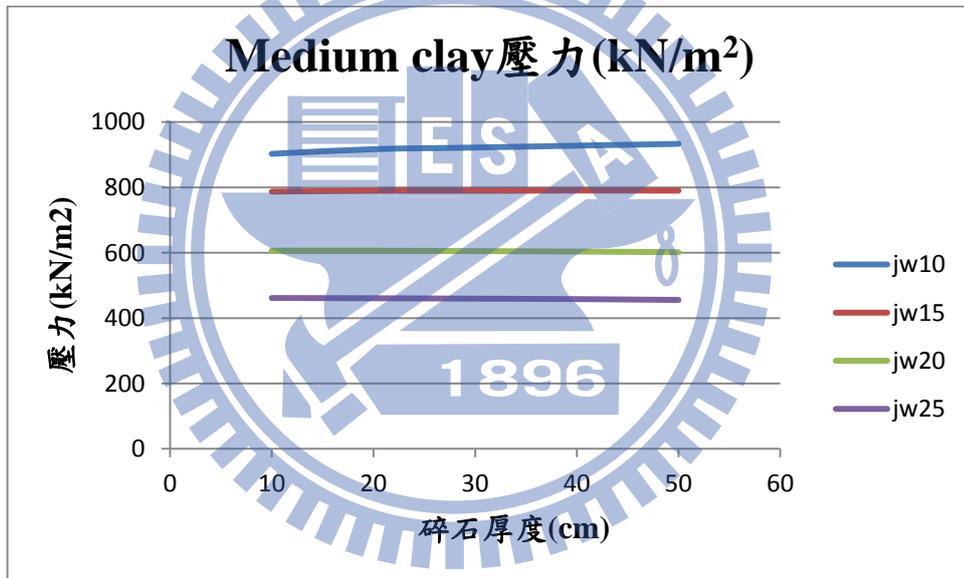
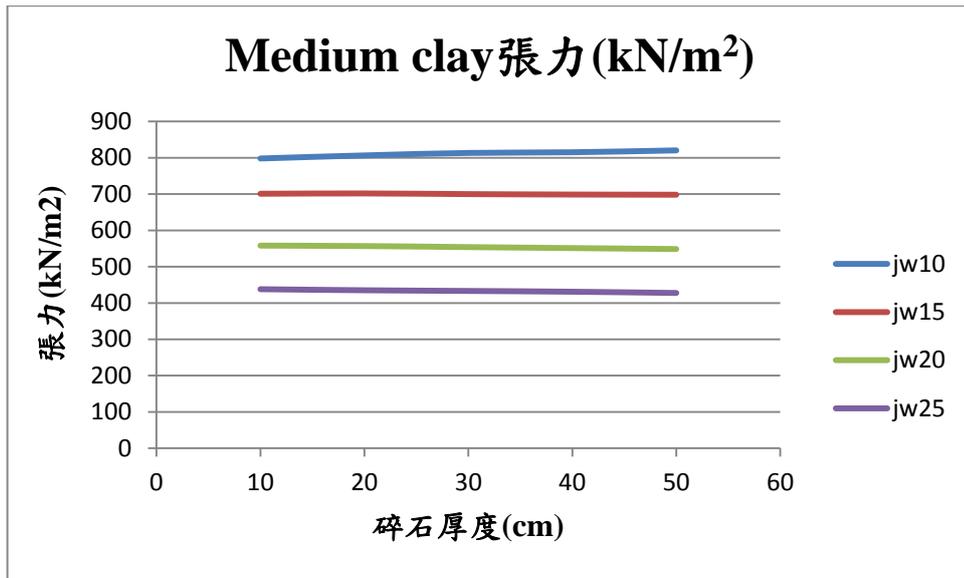


圖 4.18-2 中等強度黏土(Medium clay) (側向力 XY 向)張力及壓力圖

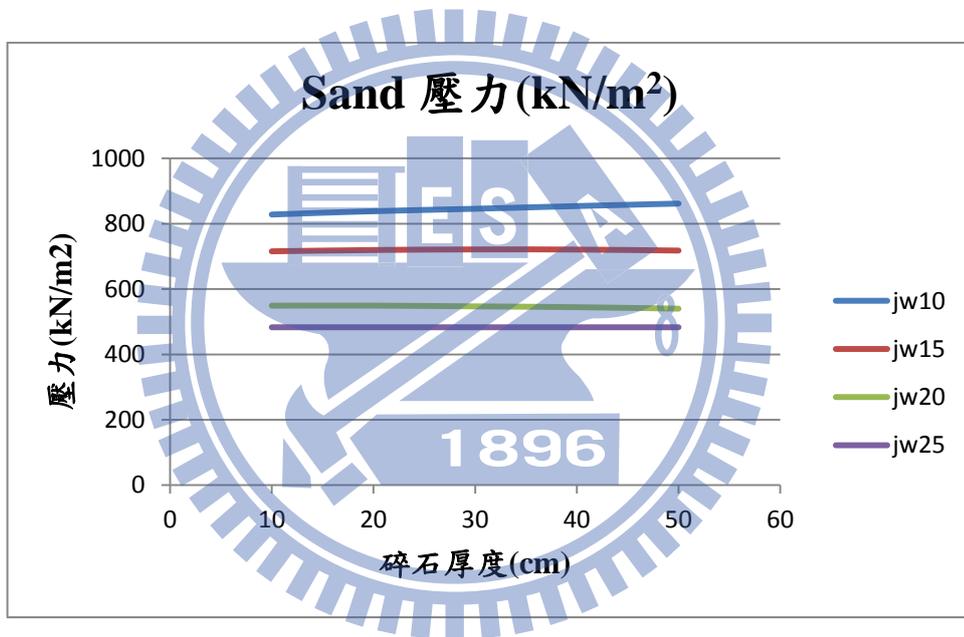
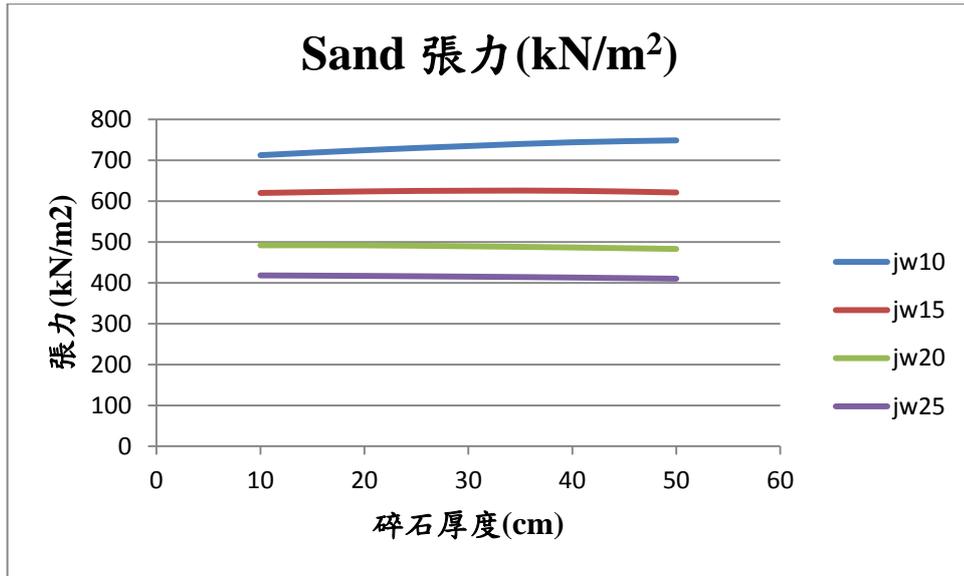


圖 4.18-3 一般砂土(Sand) (側向力 XY 向)張力及壓力圖

4.3 結構承載力討論

4.3.1 有效應力承載力探討

依本研究案 JW 鋪面及土壤參數設定，材料模型採常用之莫耳庫倫參數為主，其壓力為持續增加，但反映材料的應力應變關係，破壞準則是反映材料處於壓力強度條件下即發生直接判斷為剪破壞的，都是發生抗剪強度極低的情況。

由表 4.4 得知若 42 噸卡車承載壓力 483kN/m^2 下，設若側向力(XY 方向)張力及壓力大於 483kN/m^2 時，代表壓力在莫耳庫倫定律中持續增加，則 JW 及土壤已破壞，若依此趨勢結果而言，JW 承載力在砂土及中等強度黏土其 JW 混凝土厚度需達 25 公分以上，碎石則依其貯水容量在 10 公分以上均可承受。

以上承載力之討論在張力及剪力分析下，張力中軟弱黏土可以支撐載重，係因 JW 層混凝土強度及厚度之關係承受載重，若以保守估算承載力，則以正剪力及負剪力方式不超過壓力下估計較為保守。

4.3.2 各種車輛承載力

本研究以 42 噸拖車、21 噸卡車與 15 噸卡車等均以 $483\text{Kpa}(70\text{psi})$ 胎壓為基準，及轎車胎壓 $220\text{kpa}(32\text{psi})$ 等車輛，搭配 JW 混凝土 25cm、20cm、15 及 10cm，及砂土層土壤，以 Plaxis 分析後成果判讀側向力(XY 方向)之數據如表 4.6，依 4.3 節方式論述由表得知拖車 42 噸其 JW 混凝土以厚度 25 公分搭配 10 公分以上貯水碎石才能承受承載力、21 噸卡車則 JW 混凝土以厚度 20 公分搭配 10 公分以上貯水碎石即可，15 噸卡車其 JW 混凝土以厚度 15 公分搭配 10 公分以上貯水碎石就能承受承載力，而轎車只要 JW 混凝土以厚度 10 公分以上搭配 10 公分以上貯水碎石均可承受承載力。且依據 Pcase 路面設計軟體求出厚度(如表 4.5)，與上述之各車種 JW 混凝土承載厚度較為接近。

表 4.6.1 42T 級 20T 車輛承受側向力(XY 方向)

42T 拖車		胎壓 483kpa(70psi)				
Sand	碎石					
jw10	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)(正值)	712.5	724.7	734.9	744	748.7	
壓力(kN/m ²)(負值)	828	838.2	845.6	853.9	861.5	
jw15	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)(正值)	620	623.8	625.5	625.2	621.2	
壓力(kN/m ²)(負值)	715.4	719.4	721.2	720.8	717.7	
jw20	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)(正值)	491.9	491.8	489.5	486.6	483	
壓力(kN/m ²)(負值)	549.1	549.2	547	544.5	540	
jw25	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)(正值)	386.7	385.3	382.9	380.6	377.9	
壓力(kN/m ²)(負值)	418.2	417	415.2	413	410.1	
標準值	483	483	483	483	483	
21T 卡車		胎壓 483kpa(70psi)				
Sand	碎石					
jw10	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	662.7	667.7	669.3	673.3	666.2	
壓力(kN/m ²)	677.9	681.3	686	683.9	673	
jw15	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	566.6	568.2	568.3	565.7	561.5	
壓力(kN/m ²)	567.8	567.8	565.6	565.5	559.3	
jw20	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	407.4	406.1	403.3	400.3	398.3	
壓力(kN/m ²)	408.6	407.4	406.6	404.6	400.2	
jw25	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	311.1	310	308.3	306.4	303.9	
壓力(kN/m ²)	304.7	303	302	300.3	297.7	
標準值	483	483	483	483	483	

表 4.6.1 15T 及 2T 車輛承受側向力(XY 方向)

15T 卡車		胎壓 483kpa(70psi)				
Sand	碎石					
jw10	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	555.1	556.6	556.1	554.8	549.4	
壓力(kN/m ²)	469.5	470.9	470.3	468.6	460.3	
jw15	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	416.1	414.8	411.9	409.3	401.7	
壓力(kN/m ²)	386	384	382	387.4	369.7	
jw20	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	276.7	275.7	273.8	272.3	265.4	
壓力(kN/m ²)	271.5	269.8	268.6	264.8	261.3	
jw25	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	201.8	200.7	199.5	198.1	196.9	
壓力(kN/m ²)	203.3	201.8	200.2	198.5	196.2	
標準值	483	483	483	483	483	
2T 轎車		胎壓 220kpa(32psi)				
Sand	碎石					
jw10	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	3.712	3.254	2.9	2.691	2.5	
壓力(kN/m ²)	4.604	4.116	3.755	3.403	3.376	
jw15	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	2.751	2.474	2.243	2.018	1.992	
壓力(kN/m ²)	2.962	2.775	2.587	2.465	2.42	
jw20	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	2.089	1.943	1.79	1.647	1.519	
壓力(kN/m ²)	2.03	1.942	1.854	1.768	1.734	
jw25	10	20	30	40	50	
張力(kN/m ²)	1.59	1.5	1.405	1.309	1.223	
壓力(kN/m ²)	1.57	1.5	1.471	1.367	1.399	
標準值(kN/m ²)	20	20	20	20	20	

4.3.3 Pcase 驗證

依據 Pcase 程式中，採剛性路面設計厚度，成果判讀數據如表 4.7.1 及 4.7.2，其 15T 卡車行駛之鋪面最小設計厚度為 17 公分，20T 卡車行駛之鋪面最小設計厚度為 20 公分，36T 卡車行駛之鋪面最小設計厚度為 22 公分，與 Plaxis 分析各種車輛承載力之厚度相吻合。

4.3.4 混凝土強度探討

依 Plaxis 2d 採混凝土 210kgf/cm^2 、混凝土 280kgf/cm^2 、混凝土 350kgf/cm^2 以及台灣營建研究院採用 1980 kg/cm^2 特殊高強度混凝土，配合碎石 50cm、40cm、30cm、20cm 及 10cm 等，在一般砂土、一般黏土及軟弱黏土、依沉陷量來判讀混凝土強度詳附錄一。

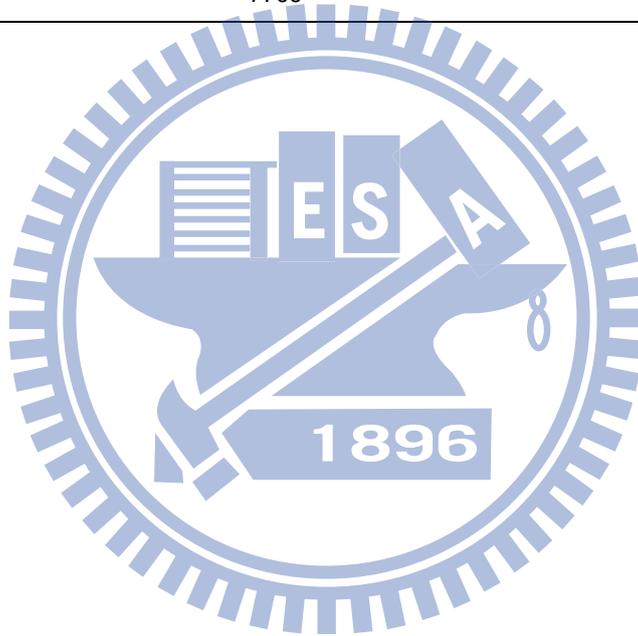
依 JW25G50 沉陷量分析，混凝土強度 210kgf/cm^2 、 280kgf/cm^2 及 350kgf/cm^2 其沉陷量差距極微，若一般砂土及中等強度黏土因土壤設定參數之強度關係，在 JW 混凝土在 20cm 及碎石 10cm 以上其有無換土均無差異，但若軟弱黏土在 JW 混凝土 20cm 及碎石 10cm，則置換砂土達 40cm 才能達一般砂土之強度。

表 4.7.1 PCASE 15T 及 20T 車輛設計厚度數據

Layer Information		15T 卡車							
Layer Type	Material Type	Frost Code	Flexural Strength (MPa)	% Steel	Analysis	Non frost Design Thickness (mm)	Reduced Subgrade Strength (mm)	Limited Subgrade Penetration (mm)	K Strength (kPa/mm)
PCC	N/A	NFS	4.48	0	Compute	170	0	0	0
Drainage	N/A	NFS	0	0	Manual	102	0	0	2.71
Separation	N/A	NFS	0	0	Manual	102	0	0	2.71
Natural Subgrade	Cohesive Cut	NFS	0	0	Manual	0	0	0	0
Traffic Information									
Pattern Name :		PLAN3							
Vehicles	Weight (kg)	Passes per Life Span	Equivalent Passes						
TRUCK, 3 AXLE	15876	10000	10000						
Equivalent Single Axle Loads			369						
Layer Information		20T 卡車							
Layer Type	Material Type	Frost Code	Flexural Strength (MPa)	% Steel	Analysis	Non frost Design Thickness (mm)	Reduced Subgrade Strength (mm)	Limited Subgrade Penetration (mm)	K Strength (kPa/mm)
PCC	N/A	NFS	4.48	0	Compute	193	0	0	0
Drainage	N/A	NFS	0	0	Manual	102	0	0	2.71
Separation	N/A	NFS	0	0	Manual	102	0	0	0
Natural Subgrade	Cohesive Cut	NFS	0	0	Manual	0	0	0	0
Traffic Information									
Pattern Name :		PLAN2							
Vehicles	Weight (kg)	Passes per Life Span	Equivalent Passes						
TRUCK, 4 AXLE	20683	10000	10000						
Equivalent Single Axle Loads			36191						

表 4.7.2 PCASE 36T 設計厚度數據

Layer Information		36T 拖車							
Layer Type	Material Type	Frost Code	Flexural Strength (MPa)	% Steel	Analysis	Non frost Design Thickness (mm)	Reduced Subgrade Strength (mm)	Limited Subgrade Penetration (mm)	K Strength (kPa/mm)
PCC	N/A	NFS	4.48	0	Compute	223	0	0	0
Drainage	N/A	NFS	0	0	Manual	102	0	0	2.71
Separation	N/A	NFS	0	0	Manual	102	0	0	2.71
Natural Subgrade	Cohesive Cut	NFS	0	0	Manual	0	0	0	0
Traffic Information									
Pattern Name :		PLAN1							
Vehicles	Weight (kg)	Passes per Life Span	Equivalent Passes						
TRUCK, 5 AXLE	36287	10000	10000						
Equivalent Single Axle Loads			7709						



第五章 結論與建議

本研究主要探討 JW 混凝土鋪面層為 25cm、20cm、15cm 及 10cm，碎石層為 10cm、20cm、30cm、40cm 及 50cm，與砂土、一般黏土及軟弱黏土組合分析依 Plaxis 有限元素程式，探討在固定載重下其瞬間沉陷量及各層變形量及應變量，以下將本研究之結果做下列結論及建議。

5.1 承载力有限元素相關分析

本研究係以固定胎壓(483KN/m^2)分析在 JW 混凝土鋪面，搭配不同碎石厚度及土壤，對 JW 鋪面各層沉陷量及有效應變之影響。綜合前章討論之趨勢，歸納以下幾個重點。

1. JW 工法透水鋪面其結構類似混凝土版之功能，依圖 4.11 顯示，在成果判讀各單層混凝土鋪面厚度之瞬間沉陷量幾乎為零，基本上表示混凝土已承受大部分壓力，因此混凝土厚度受張力破壞即為破碎，因此 JW 厚度決定鋪面為主要因素之一。
2. 依圖 4.11 顯示由碎石趨勢走向，可看出碎石厚度愈大其碎石層沉陷量越大，而土壤沉陷量相對減少，此現象可看出碎石受到上層壓力向兩側擠壓，對下方土壤產生壓力相對減少，此表示碎石代表改良部分土壤作用。
3. 在軟弱土層其土壤未經改良，其沉陷量較一般中等強度黏土為大，雖上層碎石可視為土壤改良，但後續碎石層為貯水層，為防止土壤液化，建議軟化黏土需置換土壤或改良，以為鋪面之安全。
4. 依據 Plaxis 模擬承载力以 483KN/m^2 為標準，依成果判讀之垂直 Y 向壓力及張力資料顯示，JW 混凝土鋪面厚度 20 公分以上，碎石厚度 10 公分以上，於各種土壤其張力強度均在 360 kN/m^2 以下，未超過標準值。但在底層為軟弱黏土，依成果判讀之 XY 向之剪力顯示壓力及張力資料，其所有壓力及張力均超過 483KN/m^2 ，則顯示 JW 工法透水鋪面混凝土厚度都破壞，此表示軟弱黏土層，需做土壤改良，使其土壤強度至少須達到中等強度黏土層性質。
5. 以底層為砂土層時，混凝土厚度 25，其最大壓力為 386.7KN/m^2 ，張力為 418.2KN/m^2 ，其餘厚度在 25 公分以下均在標準以上，但依各種車輛承载力而言，除 42T 重型拖車須採用 25 公分，其餘車種依車種承載重量，厚度可以相對減少。

6. JW 工法透水鋪面其頂層主要結構為混凝土，依附錄一其 210 kgf/cm^2 、 280 kgf/cm^2 及 350 kgf/cm^2 瞬間沉陷量差距甚微，因此可視為混凝土不隨強度增加而沉陷量減少，所以混凝土基本強度在 210 kgf/cm^2 (3000 psi) 即可，除有特殊考量則可添加鋼纖維，以增加磨耗度及混凝土強度。

5.2 有限元素分析研究結果

1. JW 工法透水鋪面係以 JW 透水材料配合混凝土組成面層鋪面，下層鋪設碎石層以作為貯水之功能，本研究 JW 鋪面概以分為三層攫取數據析作分析，綜合前章論述承载力結構性，歸納出下列結果。
2. 依 JW 工法透水鋪面若使用於一般高乘載道路系統，其混凝土厚度應在 25 公分以上，可承受 42 噸以上拖車；山區道路因不利行走拖車，以卡車為主則考慮 JW 工法透水鋪面混凝土厚度 20 公分；一般社區道路會考慮搬家卡車，JW 工法透水鋪面混凝土厚度 15 公分為主。以上各鋪面厚度之碎石貯水層，則依擬貯水量而設計其厚度。
3. 若依綠建築規章而言，採全保水概念則土壤層需做夯實，使土壤達到一定強度。若以半保水方式則需視土壤性質，是否需加不透水布或其他土質改良方式。
4. 由於 JW 鋪面面層係以混凝土為主要材料，其剛性混凝土鋪面遇到版邊崩損、裂縫及翹區等等現象，須加以注意。

5.3 後續研究建議

1. 本研究採通用一般性土壤分析其沉陷量及應變，若遇特殊土壤或區域性土壤應另行分析，後續研究加以討論。
2. 黏土受壓後因水分排出，其可能對沉陷量影響，不再本研究分析，未來研究可加入分析。
3. 依剛性路面設計本考量總沉陷量需做後續研究加以討論(本研究以車載重產生瞬間沉陷量為主)。
4. 後續於設計階段可搭配 PCASE 軟體，先以 PCASE 模擬厚度搭配，再搭配 Plaxis 軟體做後續分析。

參考文獻

中文

1. 內政部營建署，透水性鋪面養護工法參考手冊，2009/11。
2. 王祥銘，路基土壤受反覆載重作用之累積永久變形研究，中央大學，碩士論文，2001/7。
3. 交通部，柔性鋪面設計規範，交通部，2002。
4. 汐止市中正社區發展協會網站，<http://street.twcom.net/index2.html>，2013。
5. 江筱嵐，“剛性鋪面邊、角破損最佳維修斷面之分析研究”，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2000。
6. 吳松峯，PCASE 與常用鋪面結構設計方法之比較與評估，雲林科技大學，碩士論文，2005。
7. 吳政松，「透水鋪面對工程環境之影響效益分析」，中央大學，碩士論文，2005。
8. 吳學禮，鋪面、材料工程實務，二版，詹式書局，2005。
9. 李釗、黃書猛、許書王、夏桂華，“機場鋪面維修問題之探討”，國軍第十一屆軍事工程研討會，pp.171-179，1999。
10. 李維峰，賴盈如，廖南華，「土釘加勁邊坡二維數值分析方法」，地工技術，第 98 期，第 39-54 頁，2003。
11. 李維峰、鄭瑞濱，「JW 防災空調導水鋪面研究報告」，台灣營建研究院，2004。
12. 周家蓓，“剛性鋪面之破壞檢測及維修對策概述”，當代混凝土鋪面設計講習會，2000。

13. 房性中，「台灣地區鋪築剛性路面之問題探討」現代營建第 229 期，1999。
14. 林志棟，「透水鋪面工法性能試驗解析」，台灣內政部建築研究所，2004。
15. 林志憲，陳偉全「AASHTO 鋪面厚度設計之力學數值分析」，臺灣公路工程，第三十卷第四期，27-39 頁，2003。
16. 邱太昌，土工蜂巢格網介面特性與鋪面設計成效評估，中原大學，碩士論文，2008。
17. 姜惠宗，路基土壤含水量變化對鋪面績效之影響，中央大學，碩士論文，2005。
18. 柳中明、陳瑞文、陳起鳳、劉銘龍、陳明烈、陳瑞成、蕭香娟、陳世勳、陳庭豪，2012：“因應氣候變遷，創造海綿城市—由建設海綿社區、海綿工業區著手”，2012。發表於「低碳生活部落格」，http://lowestc.blogspot.tw/2012/05/blog-post_8603.html。
19. 張貴祿，“剛性鋪面評估與維修智慧型諮詢系統之研究-評估系統雛形之建立”，淡江大學土木工程研究所碩士論文，1999。
20. 莊國義 翁彩瓊，透水鋪面施工程序抗壓特性探討，中華民國建築學會第二十一屆第一次建築研究成果發表會論文集，2009。
21. 陳立，“剛性道面裂縫修補材料基本力學性質之研究”，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，1994。
22. 陳治中，智慧型機場剛性鋪面維修專家系統之應用，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2001。
23. 陳建旭 王慶雄，Clegg 衝擊試驗評估鋪面結構之成果分析，30-44 頁，2011。
24. 陳順興，剛性鋪面刨磨工法之研究，中央大學，碩士論文，2002。

25. 陳瑞文，「結構性空調導水鋪面對陸生圈生態環境之貢獻」，中華鋪面工程學會，綠營建、綠建築、綠建材透水性鋪面研討會專輯，2006。
26. 陳瑞文，「結構性透水鋪面與永續地下水資源及生態環境保育」，陸生圈碳匯評估及管理策略研討會，2006。
27. 陳瑞文，「環保透水混凝土鋪面施工法」專利公報, 2001.12.01。
28. 馮天正，「三維有限元素應用於柔性鋪面之非線性分析」，中央大學，碩士論文，2000。
29. 葉銘欽，透水性鋪面專家諮詢系統建置之研究，中央大學，碩士論文，2006。
30. 劉同敏，“剛性鋪面診斷維修專家系統之建立”，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，1996。
31. 歐章煜，「深開挖工程分析設計理論與實務」，科技圖書股份有限公司，2002。
32. 歐章煜，「深開挖工程理論分析之發展」，地工技術，第 100 期，第 127-134 頁，2004。
33. 蔡攀鰲，公路工程學，第三次修訂，著者發行，2003。
34. 戴裕聰，土壤吸力對路基土壤之力學特性影響探討，中央大學，碩士論文，2004。
35. 簡婉芸，「透水性鋪面對基地保水量敏感度之分析」，中央大學，碩士論文，2007。

英文

1. Bjerrum, L. "Observed Versus Computed Settlement of Structures on Clay and Sand," presented at the Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge Mass March, 1964.
2. Bowles, J.E., "Foundation Analysis and Design," 3th Edition, McGraw-Hill, New York, 1982.
3. Brooker, E.W., and H.O. Inland, "Earth Pressure at rest related to stress history, " Canadian Geotechnical Journal, Ontario, Vol.2,no.1, 1965.
4. D'Appolonia, D.J., "Settlement of Spread Footing and Design," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.94, SM3, May, 1970.
5. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project, National Research Council, Washington DC., 1993.
6. Geotechdata.info, Soil Young's modulus, <http://geotechdata.info/parameter/soil-elastic-young-modulus.html> (as of September 17.09.2013).
7. "Guideline and Procedures for Maintenance of Airport Pavements – Advisory Circular, " Federal Aviation Administration, AC:150/5380-6 , 1982.
8. Shimons, N.E. and Menzies, B.K., "A Short Course in Foundation Engineering, " Butterworth & Co.Ltd., 1977.

附錄

一、Plaxis 2d 分析

依 Plaxis 2d 採混凝土 210kg/cm²、混凝土 280 kg/cm²、混凝土 350 kg/cm² 以及台灣營建研究院採用 1980 kg/cm² 特殊高強度混凝土，配合碎石 50cm、40cm、30cm、20cm 及 10cm 等，在一般砂土、一般黏土及軟弱黏土、依沉陷量分析如附表 1.1~1.20。

附表 1.2 JW=25cm 碎石=50cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 50cm	無碎石	一般砂 土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.229	0.212	0.175	0.177	0.178	0.179	0.183	0.177	0.169	0.161
混凝土 350	0.317	0.289	0.264	0.264	0.264	0.263	0.297	0.286	0.271	0.254
混凝土 280	0.331	0.301	0.277	0.278	0.277	0.276	0.316	0.303	0.287	0.269
混凝土 210	0.348	0.316	0.296	0.296	0.294	0.293	0.341	0.327	0.31	0.29

附表 1.2 JW=25cm 碎石=40cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 40cm	無碎石	一般砂 土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.23	0.217	0.178	0.18	0.182	0.183	0.188	0.182	0.175	0.167
混凝土 350	0.318	0.296	0.269	0.27	0.27	0.27	0.307	0.396	0.283	0.267
混凝土 280	0.332	0.308	0.282	0.284	0.283	0.283	0.326	0.315	0.3	0.283
混凝土 210	0.349	0.324	0.301	0.302	0.302	0.3	0.352	0.34	0.324	0.305

附表 1.3 JW=25cm 碎石=30cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 30cm	無碎石	一般砂 土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.232	0.222	0.18	0.183	0.184	0.186	0.193	0.188	0.181	0.174
混凝土 350	0.32	0.303	0.273	0.275	0.275	0.275	0.315	0.306	0.294	0.279
混凝土 280	0.333	0.315	0.287	0.289	0.289	0.289	0.334	0.325	0.312	0.296
混凝土 210	0.35	0.331	0.306	0.308	0.308	0.307	0.362	0.351	0.337	0.319

附表 1.4 JW=25cm 碎石=20cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 20cm	無碎石	一般砂 土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.233	0.227	0.182	0.185	0.187	0.189	0.197	0.192	0.187	0.18
混凝土 350	0.321	0.31	0.276	0.279	0.28	0.281	0.322	0.314	0.304	0.29
混凝土 280	0.334	0.322	0.290	0.293	0.294	0.295	0.342	0.334	0.323	0.308
混凝土 210	0.351	0.339	0.310	0.313	0.314	0.314	0.37	0.361	0.349	0.333

附表 15 JW=25cm 碎石=10cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 10cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.234	0.231	0.183	0.186	0.189	0.191	0.2	0.197	0.192	0.185
混凝土 350	0.338	0.331	0.299	0.303	0.305	0.305	0.376	0.367	0.354	0.336
混凝土 280	0.335	0.329	0.292	0.297	0.299	0.3	0.348	0.342	0.333	0.319
混凝土 210	0.352	0.346	0.312	0.317	0.319	0.319	0.377	0.37	0.36	0.345

附表 1.6 JW=20cm 碎石=50cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 50cm	無碎石	一般砂土	中等強度黏土	黏土換砂土 20cm	黏土換砂土 40cm	黏土換砂土 60cm	高水位軟弱黏土	軟弱黏土換砂土 20cm	軟弱黏土換砂土 40cm	軟弱黏土換砂土 60cm
混凝土 1980	0.299	0.273	0.244	0.245	0.245	0.245	0.274	0.264	0.251	0.236
混凝土 350	0.404	0.366	0.355	0.355	0.353	0.35	0.433	0.415	0.392	0.365
混凝土 280	0.42	0.38	0.372	0.372	0.37	0.366	0.458	0.439	0.415	0.385
混凝土 210	0.441	0.398	0.394	0.395	0.392	0.387	0.493	0.473	0.445	0.413

附表 1.7 JW=20cm 碎石=40cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 40cm	無碎石	一般砂土	中等強度黏土	黏土換砂土 20cm	黏土換砂土 40cm	黏土換砂土 60cm	高水位軟弱黏土	軟弱黏土換砂土 20cm	軟弱黏土換砂土 40cm	軟弱黏土換砂土 60cm
混凝土 1980	0.3	0.28	0.248	0.25	0.25	0.251	0.282	0.273	0.261	0.247
混凝土 350	0.405	0.375	0.362	0.363	0.362	0.359	0.446	0.431	0.41	0.385
混凝土 280	0.42	0.38	0.372	0.372	0.37	0.366	0.458	0.439	0.415	0.385
混凝土 210	0.442	0.408	0.402	0.404	0.403	0.399	0.51	0.491	0.467	0.437

附表 1.8 JW=20cm 碎石=30cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 30cm	無碎石	一般砂土	中等強度黏土	黏土換砂土 20cm	黏土換砂土 40cm	黏土換砂土 60cm	高水位軟弱黏土	軟弱黏土換砂土 20cm	軟弱黏土換砂土 40cm	軟弱黏土換砂土 60cm
混凝土 1980	0.301	0.286	0.252	0.254	0.255	0.256	0.289	0.282	0.271	0.258
混凝土 350	0.406	0.384	0.367	0.37	0.371	0.368	0.459	0.446	0.428	0.404
混凝土 280	0.422	0.399	0.385	0.388	0.388	0.386	0.486	0.473	0.453	0.428
混凝土 210	0.443	0.418	0.408	0.412	0.412	0.41	0.524	0.509	0.487	0.459

附表 1.9 JW=20cm 碎石=20cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 20cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.302	0.292	0.254	0.258	0.259	0.26	0.295	0.289	0.28	0.268
混凝土 350	0.373	0.361	0.336	0.339	0.34	0.339	0.411	0.402	0.388	0.372
混凝土 280	0.388	0.375	0.351	0.355	0.357	0.356	0.436	0.426	0.412	0.395
混凝土 210	0.407	0.394	0.373	0.378	0.379	0.378	0.47	0.459	0.444	0.425

附表 1.10 JW=20cm 碎石=10cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 10cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.303	0.298	0.256	0.26	0.263	0.264	0.301	0.296	0.288	0.277
混凝土 350	0.409	0.401	0.375	0.381	0.384	0.384	0.479	0.47	0.457	0.438
混凝土 280	0.424	0.417	0.393	0.399	0.402	0.402	0.508	0.499	0.484	0.464
混凝土 210	0.445	0.437	0.417	0.424	0.427	0.427	0.547	0.537	0.521	0.499

附表 1.11 JW=15cm 碎石=50cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 50cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.419	0.377	0.371	0.372	0.369	0.365	0.475	0.455	0.429	0.397
混凝土 350	0.552	0.492	0.509	0.513	0.51	0.503	0.719	0.685	0.639	0.587
混凝土 280	0.572	0.509	0.529	0.533	0.531	0.524	0.759	0.721	0.673	0.616
混凝土 210	0.599	0.531	0.555	0.56	0.559	0.551	0.813	0.771	0.718	0.656

附表 1.12 JW=15cm 碎石=40cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷 單位(cm)

碎石 40cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.42	0.388	0.379	0.381	0.379	0.376	0.49	0.473	0.449	0.419
混凝土 350	0.553	0.508	0.519	0.526	0.526	0.521	0.743	0.715	0.675	0.626
混凝土 280	0.573	0.525	0.54	0.547	0.548	0.543	0.783	0.753	0.711	0.658
混凝土 210	0.6	0.549	0.566	0.575	0.576	0.571	0.84	0.805	0.759	0.702

附表 1.13 JW=15cm 碎石=30cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 30cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.421	0.397	0.384	0.388	0.389	0.386	0.503	0.489	0.468	0.441
混凝土 350	0.555	0.522	0.528	0.536	0.539	0.537	0.763	0.741	0.707	0.662
混凝土 280	0.575	0.541	0.549	0.558	0.562	0.56	0.805	0.781	0.744	0.697
混凝土 210	0.602	0.565	0.576	0.586	0.591	0.59	0.864	0.835	0.796	0.744

附表 1.14 JW=15cm 碎石=20cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 20cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.423	0.406	0.389	0.394	0.396	0.395	0.513	0.502	0.485	0.461
混凝土 350	0.556	0.535	0.536	0.545	0.55	0.551	0.782	0.763	0.735	0.697
混凝土 280	0.576	0.554	0.557	0.567	0.574	0.574	0.824	0.805	0.774	0.732
混凝土 210	0.603	0.58	0.585	0.596	0.604	0.605	0.885	0.861	0.828	0.783

附表 1.15 JW=15cm 碎石=10cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 10cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.424	0.415	0.392	0.399	0.403	0.403	0.523	0.515	0.501	0.477
混凝土 350	0.557	0.546	0.541	0.552	0.559	0.561	0.793	0.786	0.76	0.723
混凝土 280	0.577	0.566	0.563	0.574	0.582	0.585	0.843	0.824	0.802	0.762
混凝土 210	0.603	0.593	0.591	0.604	0.613	0.617	0.906	0.882	0.855	0.816

附表 1.16 JW=10cm 碎石=50cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 50cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.684	0.599	0.638	0.665	0.652	0.644	1.055	0.991	0.913	0.826
混凝土 350	0.871	0.743	0.793	0.816	0.825	0.821	1.716	1.538	1.323	1.149
混凝土 280	0.897	0.764	0.714	0.838	0.849	0.846	1.863	1.647	1.402	1.204
混凝土 210	0.934	0.793	0.841	0.868	0.88	0.879	2.103	1.848	1.538	1.277

附表 1.17 JW=10cm 碎石=40cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 40cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.685	0.621	0.651	0.667	0.673	0.67	1.093	1.037	0.969	0.889
混凝土 350	0.872	0.778	0.812	0.84	0.857	0.859	1.785	1.635	1.413	1.245
混凝土 280	0.899	0.801	0.834	0.863	0.882	0.884	1.954	1.776	1.54	1.315
混凝土 210	0.936	0.832	0.863	0.894	0.914	0.919	2.212	1.996	1.711	1.413

附表 1.18 JW=10cm 碎石=30cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 30cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.694	0.649	0.671	0.691	0.703	0.705	1.208	1.149	1.076	0.993
混凝土 350	0.873	0.813	0.83	0.86	0.883	0.892	1.864	1.741	1.567	1.367
混凝土 280	0.901	0.838	0.853	0.884	0.909	0.92	2.035	1.891	1.68	1.443
混凝土 210	0.883	0.82	0.837	0.868	0.89	0.899	2.01	1.865	1.657	1.419

附表 1.19 JW=10cm 碎石=20cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 20cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.688	0.663	0.674	0.692	0.706	0.711	1.157	1.118	1.065	1
混凝土 350	0.876	0.843	0.845	0.876	0.902	0.919	1.924	1.825	1.686	1.492
混凝土 280	0.904	0.869	0.869	0.9	0.929	0.947	2.104	1.99	1.824	1.589
混凝土 210	0.938	0.904	0.902	0.933	0.964	0.985	2.391	2.252	2.048	1.765

附表 1.20 JW=10cm 碎石=10cm 各強度混凝土各種土層瞬間沉陷量單位(cm)

碎石 10cm	無碎 石	一般 砂土	中等強 度黏土	黏土換 砂土 20cm	黏土換 砂土 40cm	黏土換 砂土 60cm	高水位 軟弱黏 土	軟弱黏 土換砂 土 20cm	軟弱黏 土換砂 土 40cm	軟弱黏 土換砂 土 60cm
混凝土 1980	0.69	0.678	0.68	0.7	0.713	0.717	1.18	1.148	1.104	1.049
混凝土 350	0.879	0.866	0.856	0.886	0.915	0.936	1.972	1.893	1.774	1.606
混凝土 280	0.906	0.893	0.88	0.913	0.941	0.963	2.159	2.071	1.928	1.717
混凝土 210	0.943	0.929	0.912	0.946	0.977	1.002	2.455	2.348	2.175	1.926

二、Plaxis 成果判讀全車段面資料分析

依 Plaxis 程式分析 JW 混凝土鋪面層為 25cm、20cm、15cm 及 10cm，碎石層為 10cm、20cm、30cm、40cm 及 50cm，與砂土、一般黏土及軟弱黏土組合分析其瞬間沉陷量及各層變形量及應變量，成果判讀資料後如下附表 2.1~2.3。下附圖 2.4~2.6 係以 JW25cm、碎石層 50cm 且其土壤為軟化黏土之總沉陷圖及各層之沉陷量圖。

附表 2.1 JW 及碎石各層與軟弱黏土間各層瞬間沉陷量(mm)

軟弱黏土(Softclay)						
JW25	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007	0.0007
	碎石層(mm)	0.0228	0.0532	0.0911	0.1353	0.1821
	軟化黏土層(mm)	2.9198	2.8461	2.7554	2.648	2.5249
	瞬間合計沉陷量(mm)	2.9434	2.9	2.8473	2.7841	2.7077
JW20	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.001	0.001	0.001	0.0009	0.0009
	碎石層(mm)	0.0252	0.0631	0.1112	0.1676	0.2277
	軟化黏土層(mm)	3.6595	3.5654	3.4466	3.3045	3.1413
	瞬間合計沉陷量(mm)	3.6857	3.6295	3.5588	3.473	3.3698
JW15	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.001	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008
	碎石層(mm)	0.0293	0.0761	0.1357	0.2061	0.2798
	軟化黏土層(mm)	4.4847	4.368	4.2175	4.0345	3.8286
	瞬間合計沉陷量(mm)	4.515	4.445	4.3541	4.2415	4.1092
JW10	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008
	碎石層(mm)	0.0215	0.0703	0.1354	0.2129	0.296
	軟化黏土層(mm)	5.022	4.9022	4.7425	4.5479	4.3243
	瞬間合計沉陷量(mm)	5.0445	4.9733	4.8788	4.7616	4.621

附表 2.2 JW 及碎石各層與中等強度黏土間各層瞬間沉陷量(mm)

中等強度黏土(Mediumclay)						
JW25	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.0007	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006
	碎石層(mm)	0.0166	0.0392	0.0658	0.0915	0.1248
	一般黏土層(mm)	1.2495	1.2154	1.1743	1.1095	1.0763
	瞬間合計沉陷量(mm)	1.2668	1.2553	1.2408	1.2016	1.2016
JW20	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.0007	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006
	碎石層(mm)	0.0198	0.0456	0.0759	0.1099	0.1468
	一般黏土層(mm)	1.4647	1.4254	1.3772	1.3221	1.2635
	瞬間合計沉陷量(mm)	1.4853	1.4716	1.4538	1.4326	1.4109
JW15	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005
	碎石層(mm)	0.022	0.0515	0.0861	0.126	0.1678
	一般黏土層(mm)	1.6639	1.6198	1.5656	1.5019	1.4371
	瞬間合計沉陷量(mm)	1.6865	1.6719	1.6522	1.6284	1.6055
JW10	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004
	碎石層(mm)	0.0207	0.0502	0.086	0.1272	0.1731
	一般黏土層(mm)	1.7709	1.7295	1.6759	1.6129	1.5457
	瞬間合計沉陷量(mm)	1.7921	1.7803	1.7624	1.7405	1.7193

附表 2.3 JW 及碎石各層與一般砂土間各層瞬間沉陷量(mm)

一般砂土(Sand)						
JW25	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005
	碎石層(mm)	0.0172	0.0365	0.0584	0.082	0.1065
	砂土層(mm)	1.4789	1.4312	1.381	1.3288	1.2757
	瞬間合計沉陷量	1.4967	1.4683	1.4399	1.4113	1.3827
JW20	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004
	碎石層(mm)	0.0172	0.0395	0.0651	0.0929	0.1218
	砂土層(mm)	1.6924	1.6373	1.5796	1.5189	1.4554
	瞬間合計沉陷量	1.7101	1.6773	1.6452	1.6122	1.5776
JW15	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004
	碎石層(mm)	0.0238	0.0482	0.0764	0.1069	0.1384
	砂土層(mm)	1.8993	1.8393	1.7742	1.7045	1.6314
	瞬間合計沉陷量	1.9228	1.8872	1.8502	1.811	1.7695
JW10	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW(mm)	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004
	碎石層(mm)	0.0222	0.0465	0.0753	0.1069	0.1395
	砂土層(mm)	2.0284	1.9661	1.8977	1.8238	1.7453
	瞬間合計沉陷量	2.0504	2.0123	1.9728	1.9303	1.8845

附表 2.4 JW 及碎石各層與軟弱黏土間各層應變量

軟弱黏土(Soft clay)						
Jw25	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.02%	0.03%	0.03%	0.03%	0.04%
	軟化黏土層	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%
JW20	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.03%	0.03%	0.04%	0.04%	0.05%
	軟化黏土層	0.07%	0.07%	0.07%	0.07%	0.07%
JW15	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.03%	0.04%	0.05%	0.05%	0.06%
	軟化黏土層	0.09%	0.09%	0.09%	0.09%	0.09%
JW10m	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.02%	0.04%	0.05%	0.05%	0.06%
	軟化黏土層	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%

附表 2.5 JW 及碎石各層與中等強度黏土間各層應變量

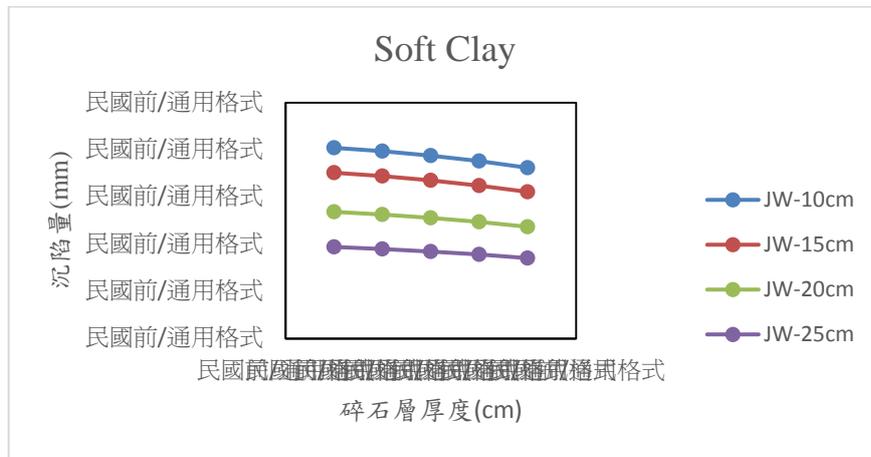
中等強度黏土 Medium Clay						
JW 25	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%
	一般黏土層	0.03%	0.03%	0.02%	0.02%	0.02%
JW20	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.02%	0.02%	0.03%	0.03%	0.03%
	一般黏土層	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%
JW15	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.02%	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%
	一般黏土層	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%
JW10	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.02%	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%
	一般黏土層	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.03%

附表 2.6 JW 及碎石各層與一般砂土間各層各層應變量

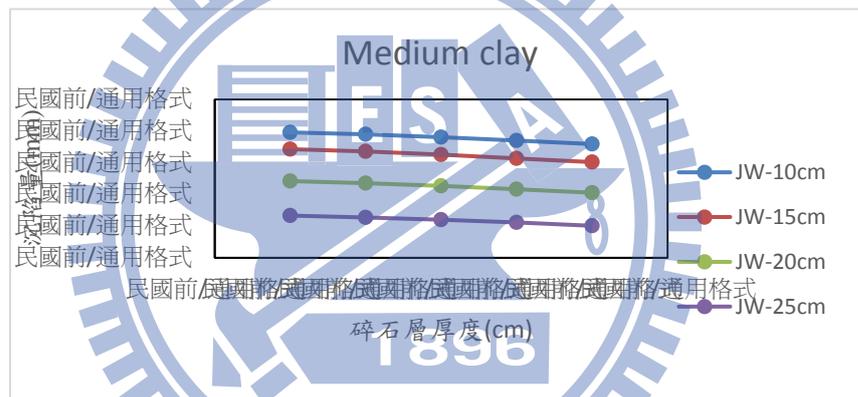
一般砂土 Sand						
JW 25	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%
	砂土層	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%
JW 20	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%
	砂土層	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%
JW 15	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.02%	0.02%	0.03%	0.03%	0.03%
	砂土層	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%
JW 10	碎石厚度	G10	G20	G30	G40	G50
	JW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	碎石層	0.02%	0.02%	0.03%	0.03%	0.03%
	砂土層	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%

依附表 2.1~2.3 成果判讀各土層之沉陷資料後，繪出下圖，其趨勢為 JW 層愈厚且碎石層愈厚，沉陷量愈小。唯碎石層厚度之影響不及 JW 混凝土層厚度之影響。其原因推斷如下：(1)JW 混凝土之彈性模數較碎石層為大，較能承載並分担載重。(2)JW 混凝土直接承受載重，其應力較

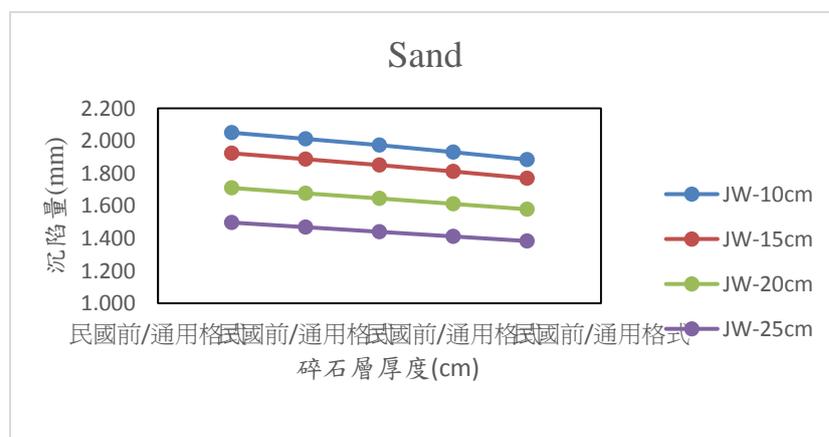
大，而碎石層則為間接傳遞應力，故應力較小，故居前者之厚度影響較大。



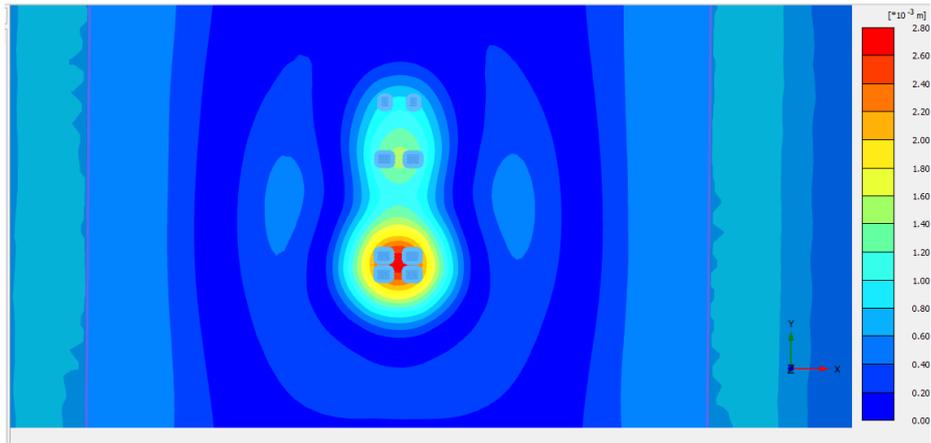
附圖 2.1 軟弱黏土之瞬間總沉陷量



附圖 2.2 中等強度黏土之瞬間總沉陷量



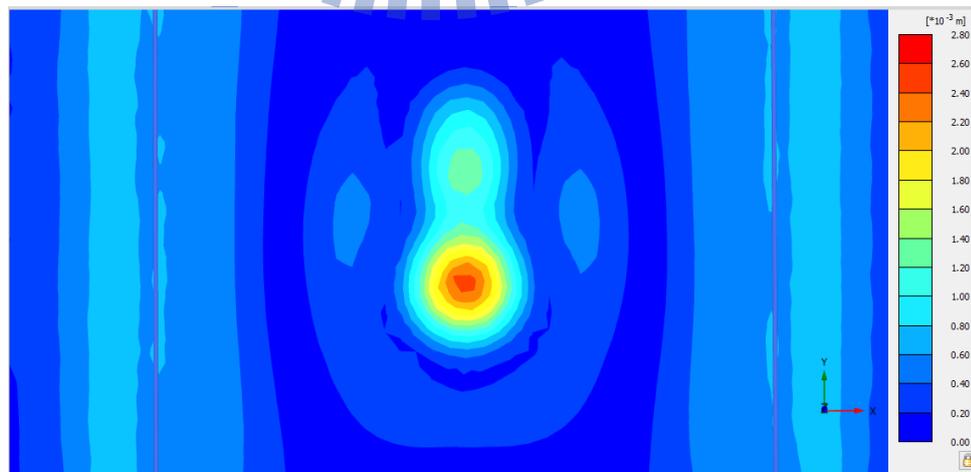
附圖 2.3 一般砂土之瞬間總沉陷量



附圖 2.4 JW25G50 在軟弱黏土層情況之沉陷分佈(最大總沉陷量 2.71mm)

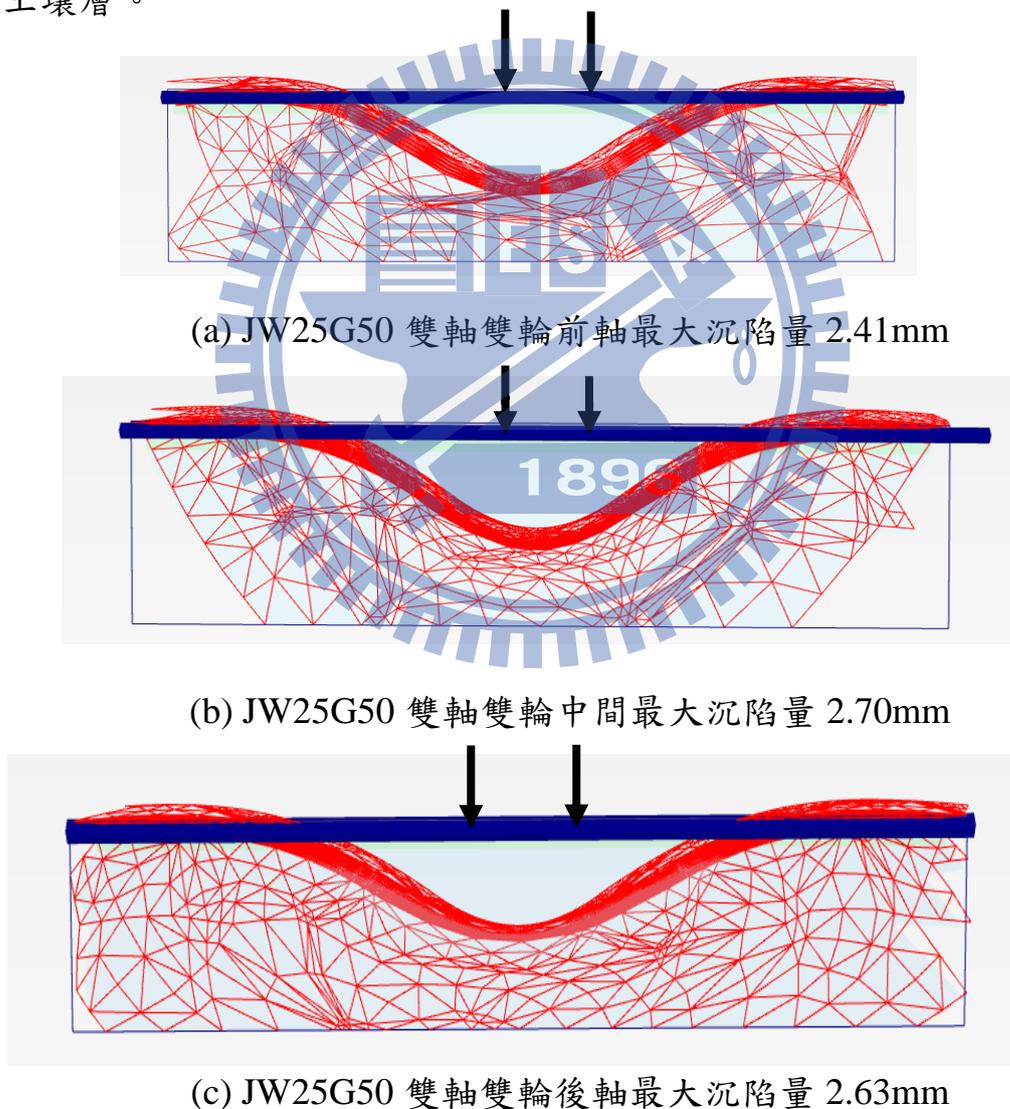


附圖 2.5 JW25G50 在軟弱黏土層之 JW 層及碎石層介面沉陷(最大 2.652mm)

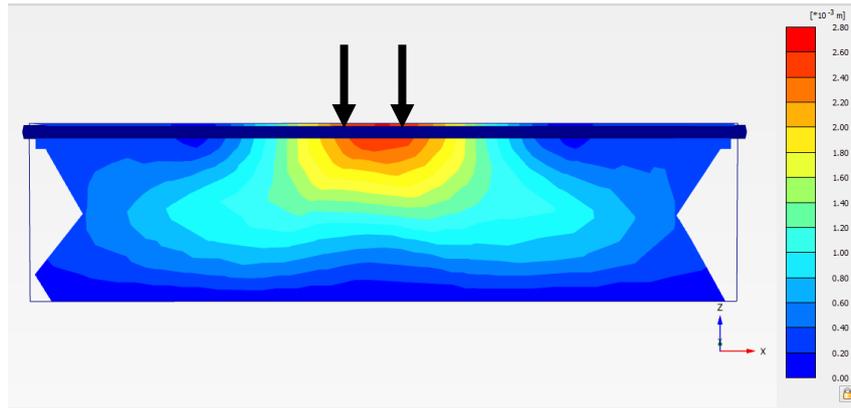


附圖 2.6 JW25G50 在軟弱黏土層之碎石層及土壤層介面沉陷(最大 2.499 mm)

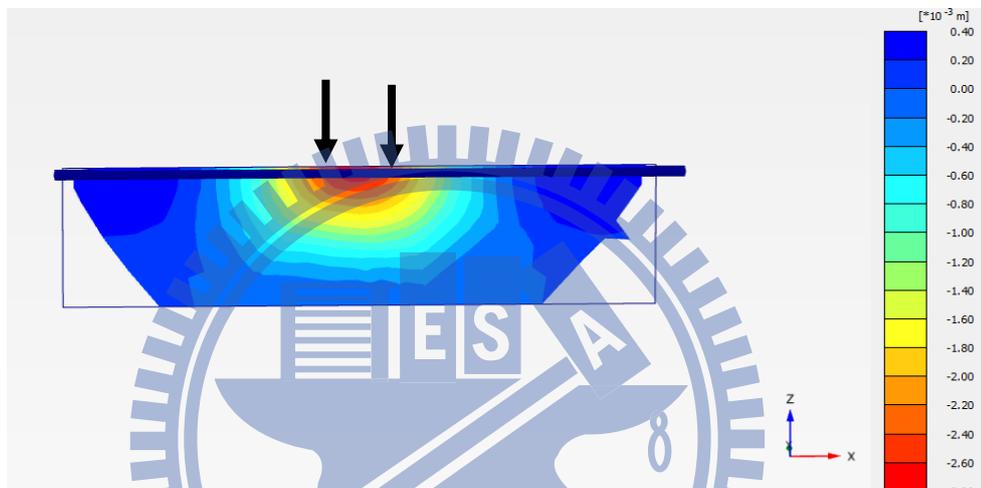
PLAXIS 依上列分析得出 JW25cm 混凝土及碎石 50cm(以下簡稱 JW25G50)其沉陷分佈如附圖 2.7，其中最大沉陷點位置為雙軸雙輪之中心點。若以圖形化則為附圖 2.8 垂直向沉陷分佈圖。由此沉陷曲線可看出，最大沉陷點係位於雙軸雙輪之中心點，而非呈雙駝峰或四駝峰的沉陷曲線，此表示 25cm 混凝土鋪面及 50cm 之碎石層已足夠使鋪面上之載重均勻化，即發揮應力平均分布之功能。若依應力分析，最大為 333.7KN/m^2 ，最小為 -296.6KN/m^2 ，依附圖 2.9 顯示應力大部份已被 JW 層承擔，故傳遞至土壤之應力甚微；依此其應變附圖 2.10 則最大應變位於土壤層。



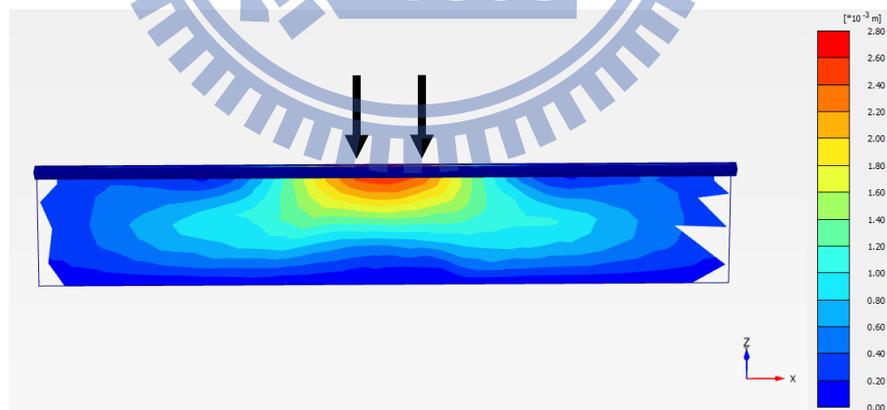
附圖 2.7 JW25G50 最大沉陷點圖



(a) JW25G50 雙軸雙輪前軸垂直向沉陷分佈圖

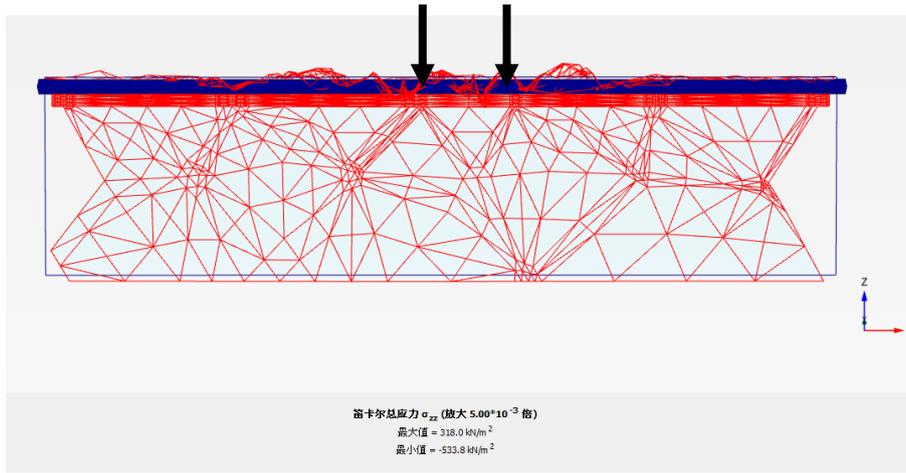


(b) JW25G50 雙軸雙輪中間垂直向沉陷分佈圖

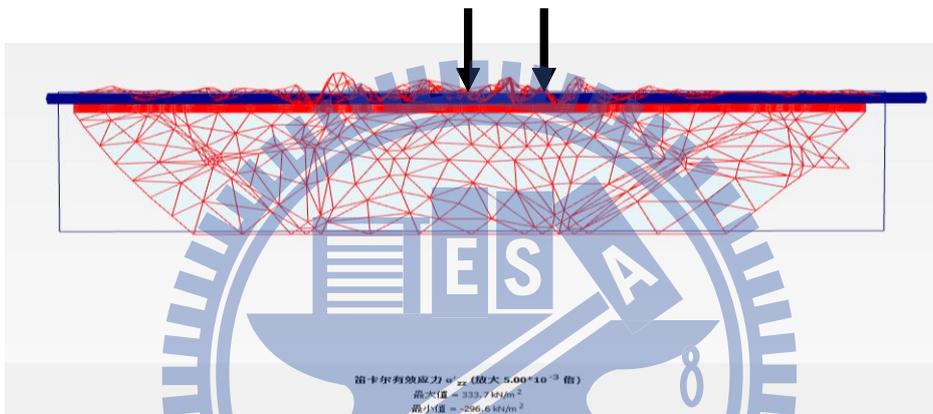


(c) JW25G50 雙軸雙輪後軸垂直向沉陷分佈圖

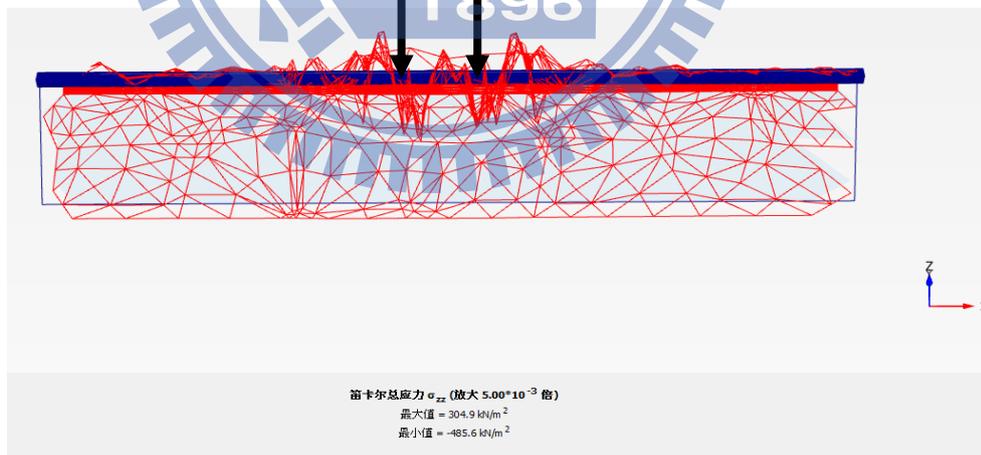
附圖 2.8 JW25G50 垂直向沉陷分佈圖



(a) JW25G50 雙軸雙輪前軸應力分佈圖

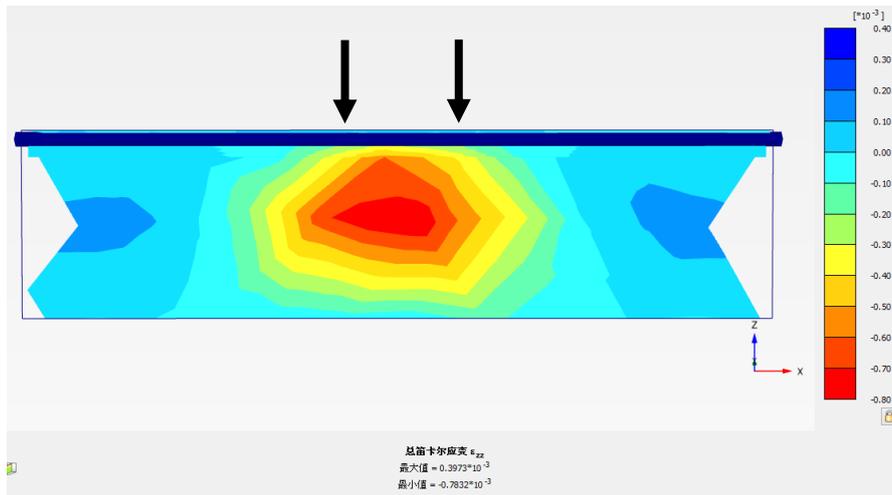


(b) JW25G50 雙軸雙輪中間應力分佈圖

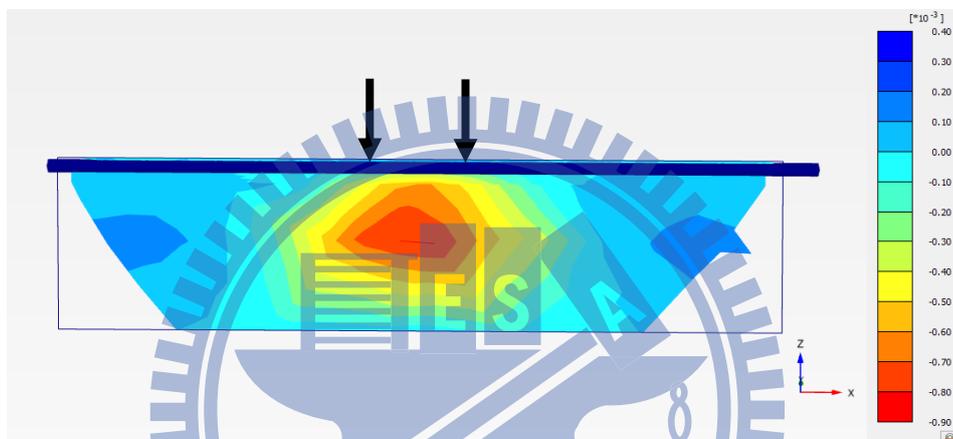


(c) JW25G50 雙軸雙輪後軸應力分佈圖

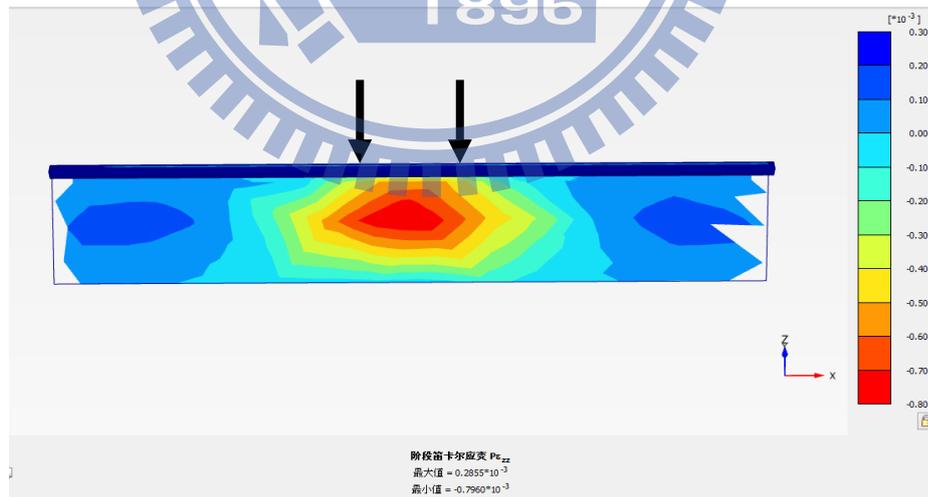
附圖 2.9 JW25G50 應力網格分佈圖



(a) JW25G50 雙軸雙輪前軸應變分佈圖



(b) JW25G50 雙軸雙輪中間應變分佈圖



(c) JW25G50 雙軸雙輪中間應變分佈圖

附圖 2.10 JW25G50 應變分佈圖

三、口試委員意見

附表 3 論文口試審查意見回覆表

項次	委員意見	回覆	頁碼
曾仁杰老師			
1	目錄、表目錄及圖目錄字體要一致	已修正詳目錄等	P.V~PXIII
2	P.2 圖參考何處	取自：汐止市中正社區發展協會	P.2
3.	研究方法與研究流程須對應	已修正對應，並加敘述如圖 1.1	P.3~4
4	5.3.2 標題錯誤	已修正為 3.1	P.26
5	於 CH2 or CH3 說明模式 axis 有幾種模式可選擇，為何採 Mohr-Coulomb 模式	說明詳 P.28	P.28
6	文獻回顧中參考文獻寫法請統一。	已統一書寫(人名,年份)詳修正紅字部份	P.6，P.10 P.11，P.14 等
7	Mohr-Coulomb 五種土壤參數英文要書寫及加編號	已修正詳 P.28~30	P.28~30
8.	標題最後一行須加一行文字或移到下一頁	已修正	
9	P42 總沉陷量已定義後續總沉陷量需修正	修正為瞬間合計沉陷量(mm)詳 P.43,P51~53	P.43,P51~53
10.	結論部份文詞需修正	已修正及增加詳 P75~P76	P.75~P.76
11	參考文獻字體大小不一	已修正詳參考文獻	P.77
12	附錄一表格字體過大需修正	已調整詳附錄一	P.81
王世旭老師			
1.	圖 1.1 參考於何處	摘自汐止市中正社區發展協會	P.2
2	本研究不能出現本計畫	已修正詳 P.2	P.2
3.	研究目的再明確	依王老師意見修正	P.3
4	有限元素方格大小怎麼決定	網格全部採用細網格式	P4

項次	委員意見	回覆	頁碼
5	邊界如何設定	邊界條件設定為固定式	P4
6	硬式路面是否考慮車轍	硬式路面不考慮車轍	
7	不同級配厚度之路面或鋪面層厚度相同?	依土壤性質而定，詳結論，例如底層為軟弱黏土，則顯示 JW 工法透水鋪面混凝土厚度都破壞	P.75
8.	參考文獻寫法不一致	已統一書寫(人名,年份)詳第二章修正	P.6
9	公式部分不清楚	印表機關係，已修正	P.17
10	第三章編號及編排方式請修正	5.3.2 標題已修正為 3.1	P.26
11	Mohr-Coulomb 五種土壤參數英文要書寫	已修正詳 P28~30	P.28~30
12	P46 邊界條件為何取 60 公尺(寬)×100 公尺(長)×5 公尺(深)及 9 公尺*14 公尺*5 公尺	以六車道含人行道之 30 公尺路寬加一倍影響範圍，故取 60 公尺(寬)×100 公尺(長)×5 公尺(深)9 公尺*14 公尺*5 公尺之邊界條件，來考量沉陷之變化，其計算時間減少約 20 倍，	P.46~47
13	參考文獻中英文分開，英文依字母順序	已修正詳參考文獻	P72
14	結論應與研究目的一致	同 7	
15	附錄一需在本文中說明引用並說明如何看	已調整詳附錄一	
李欣運老師			
1.	5.3.2 標題錯誤	已修正為 3.1	P26
2.	P58，P61~63 請加單位	已修正詳 P58 及 P61~63	
3.	其他如前面老師所題		