

第三章 研究方法

本研究旨在利用實驗室模型承載試驗，以得基礎承載力-沉陷量的關係，並對基礎座落於膠結不良砂岩上的承載行為與破壞機制作進一步觀察與研究。

本研究預計規劃進行 4 組不同地表的模型承載試驗，每組試驗在相同試驗條件下包含 3 塊岩樣。模擬的地層狀況分別為水平地表，同時考慮不同傾角(10° 、 20° 、 30°)下具邊坡狀的傾斜地表，因邊坡傾角過陡，邊坡破壞的控制因素大於基礎破壞的影響，經過邊坡滑動分析的檢核，本論文傾斜地表只考慮至傾角 30° 。水平地表將基礎置於試體中央，而傾斜地表將基礎置於坡頂(Crest)如圖 3.1 所示。

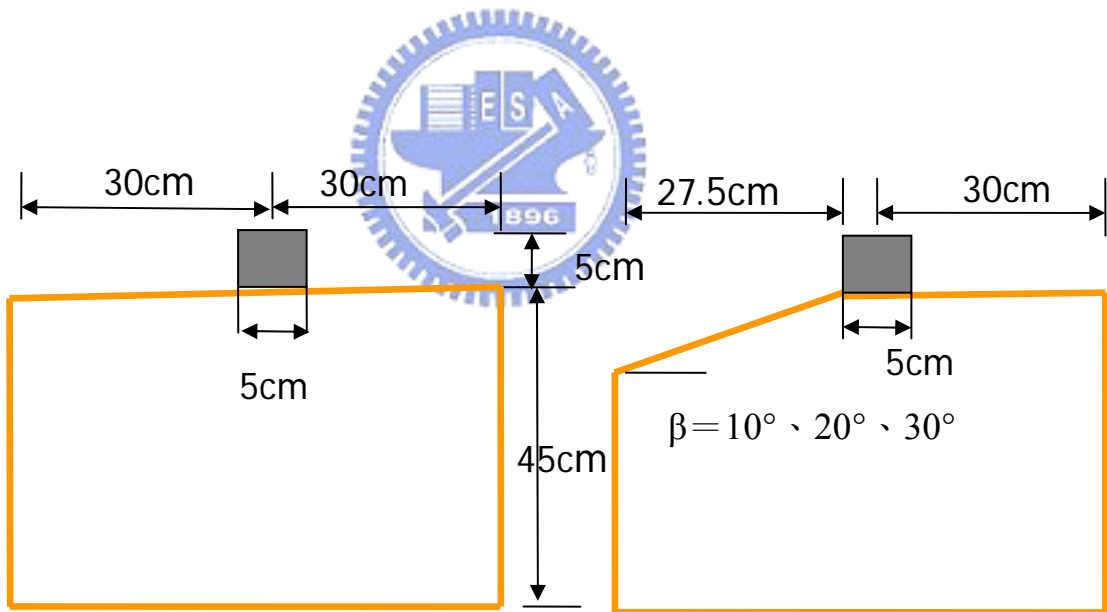


圖 3.1 人造膠結不良砂岩模擬地表狀況示意圖

本章節對研究所需的實驗設備、試體準備方法、及承載試驗方法說明如下

3.1 實驗設備

本研究設備的建立，主要依照劉英助(2002)、廖智偉(2003)所建立之實驗設備。儀器可分為其製作試體設備和承載試驗設備來討論，分別又可包括三大部分：反力系統設備、加載量測設備與模型試驗盒。各設備內容如下：

3.1.1 製作試體設備

反力系統

反力系統由反力座與反力樑構成(圖 3.2)，反力樑最高可提供 400 噸之反力。反力座四角各以 50 噸高拉力螺桿與本結構試驗室之反力地板固定以提供反力，其上承接反力樑，其中提供 400 噸之油壓千斤頂固定於反力樑之中間。

加載量測設備

本動力系統包括一個可提供推力 400 ton 千斤頂，兩條 15m 長兩端為快速接頭之油管，及一台配合加壓之油壓機。油壓機與千斤頂各有進油與出油口，可進行往覆加減載重，試驗進行實時可控制油壓機提供穩定之加載力量。其油壓機與油壓千斤頂之規格敘述如下：

(1)5HP 電動油壓泵

提供千斤頂壓力來源，製作人造軟岩試體，如圖 3.3 所示

型號: Simplex PEM6047

馬力: 5HP 220V 3 相 60HZ

工作壓力: 700 kg/cm²

吐出量: 2000 psi / 650cu. in

10000 psi / 175cu. in

3P/4W 雙動手控控制閥，具真空吸力裝置，輔助千斤頂快速回縮

油箱容量：10 加侖

(2)400 噸雙動型實心式油壓千斤頂

本研究採由欣政股份有限公司所代理並改良過之 *Simplex* 400 噸 (U.S.制單位)雙動型實心式油壓千斤頂(圖 3.4)。其規格如下:

型號: RDA 4006

能力: 推力: 400 TON 拉力: 145 TON

本體高度: 458 mm

行徑: 155 mm

外缸徑: 365 mm

內缸徑: 270 mm

軸徑: 215 mm

(3) 量測系統與資料擷取系統用於測量製作試體時的壓力，和壓密應力對試體造成之沈陷量，以及試驗時荷重對試體內部造成的應變及變化，其中包括:

(a) 量測壓密應力之 400 噸荷重計(Load cell)，型號為 LC1C-400，量測精度為 100kg。

(b) 觀察試體沈陷量之 LVDT 一支，可量測最大伸長量 15cm，型號為 LRT-S-200B，量測精度為 0.2 mm。

模型試驗盒

本試驗箱四周為四片鋼版及底部鋼承底版所構成之模具。用以製作人造軟岩試體與進行承載試驗之用。內部尺寸設計為長 600mm，寬 300mm，高 650mm 之長方體，如圖 3.5 所示。

試驗箱下部設有導水板及導水孔，以利試體製作時之排水；另外，上部有一加壓蓋板，同樣設有導水孔，以上下雙向排水方式進行。此外，於加壓蓋板與動力系統之間架有一球形座，以修正偏心所造成的影響。

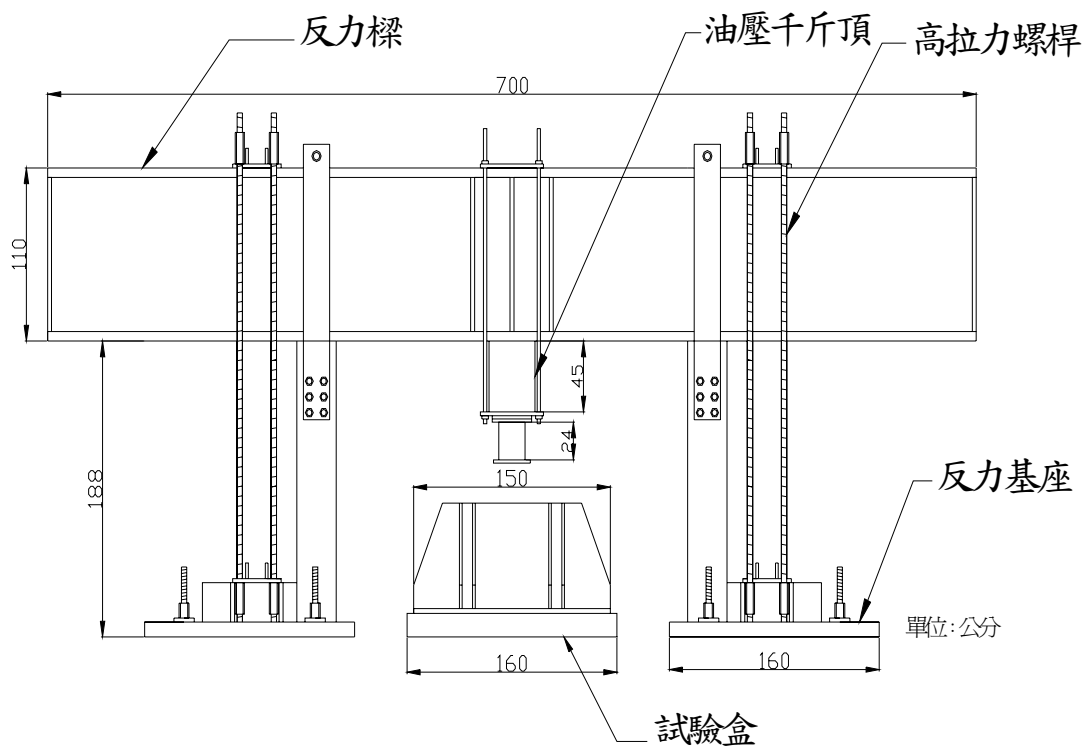


圖 3.2 製作試體設備示意圖



圖 3.3 5HP 電動油壓泵



圖 3.4 400 噸雙動型實心式油壓千斤頂



圖 3.5 試驗盒完整組立狀

3.1.2 模型承載試驗設備

反力系統

以交通大學土木結構實驗室內 MTS-244.41S 作為加載之設備，其反力座固定在結構實驗室地板上，是由四根 H400×400×13×21 的型鋼點焊組合口字型組合斷面，空心部分為 80 公分見方。(圖 3.6)

加載量測設備

交通大學土木結構試驗室之 MTS-244.41S，可以應力及應變控制之模式進行試驗，最大壓力為 500kN，最大衝程為 406.4mm，其試驗所用。(圖 3.7)

量測系統與資料擷取系統用於測量製作試體時的壓力，和壓密應力對試體造成之沈陷量，以及試驗時荷重對試體內部造成的應變及變化，其中包括：

- (a) 量測壓密應力之 50 噸荷重計(Load cell)，型號為 KYOWA LC-50TE，量測精度為 100kg。
- (b) 觀察試體沈陷量之 LVDT 兩支，可量測最大伸長量 5cm，型號為 GEFTRAN-PA1F100S，量測精度為 0.01 mm。

模型試驗盒

其設備與製作試體之模具大致相同，在試驗時模具長側面設有觀察窗(圖 3.8)，能見範圍為 250mm×400mm，其材料為三片厚度 19mm 之平板強化玻璃，用以觀察試體表面裂縫形成的先後次序。

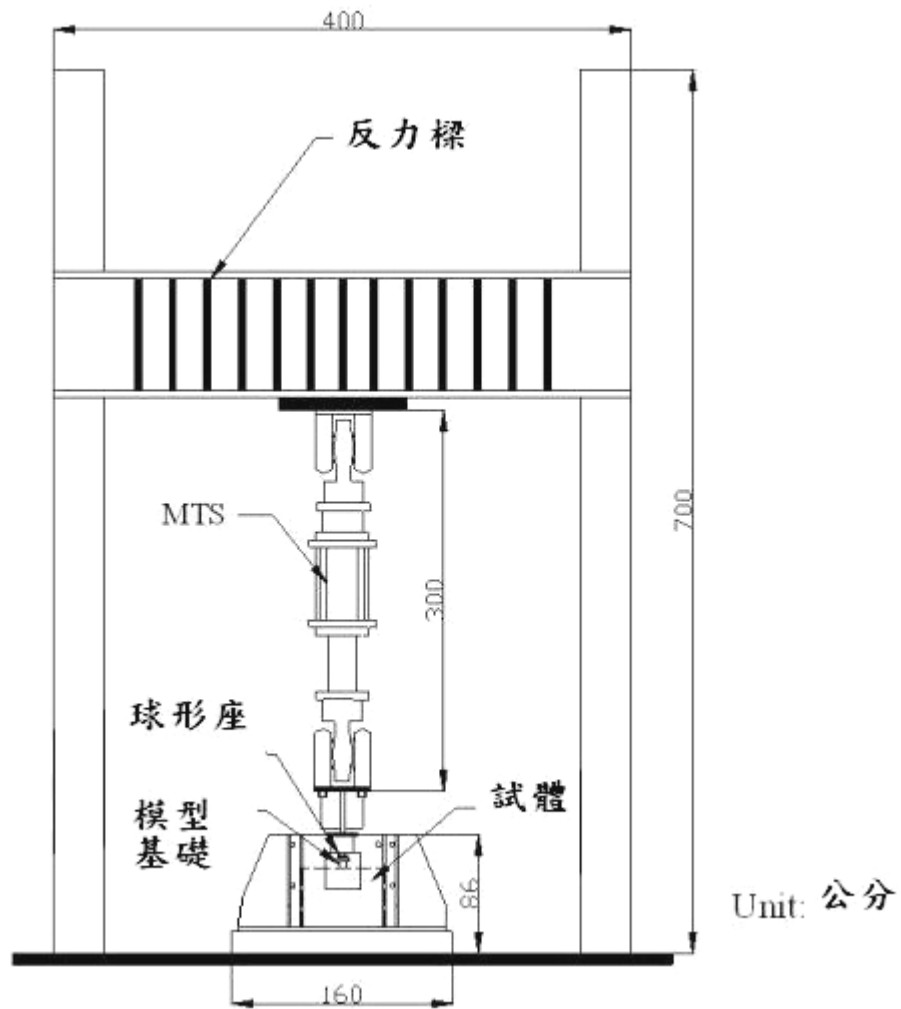


圖 3.6 基礎承載試驗設備示意圖



圖 3.7 土木結構試驗室之 MTS-244.41S



圖 3.8 觀察窗

3.2 人造膠結不良砂岩的製作

為了製作出合乎模擬的人造軟岩，依模擬對象以及實驗的目的，採取適當的材料與製作流程，以提供研究所需要之試體。本研究以新竹縣寶山第二水庫之軟弱砂岩為主要模擬目標，參考並修正劉英助(2002)所建議之製作人造軟岩之方法，摘述如下：

3.2.1 人造膠結不良砂岩材料的組成

本研究之模擬目標地層(卓蘭層及頭嵙山層)內之軟弱砂岩有別於其他地層，陳賀瑞(1997)曾指出此類砂岩由細料(粉土及黏土顆粒)膠結(或填充)，主要含量為中至細砂，且石英經顯微分析常可見風化產物及微裂縫，因此，人造軟砂岩不宜與大部分文獻上採用之乾淨石英砂、水泥、高嶺土或石膏等依不同配比加以製作。基於上述原因，本研究使用目標地層的岩屑粒料來當作基本的模擬材料。試體組成材料有岩碎屑岩料、膠結材、水，分別敘述如下：

砂岩碎屑岩料

人造軟岩的最基本也是最主要的模擬材料即為天然的軟岩本身，天然軟岩岩樣取自新竹縣寶山第二水庫工址之邊坡岩塊，岩樣取回後先行氣乾，可避免之後的研磨過程中，由於潮濕的部分形成塊狀凝結物，再將其敲碎、研磨以成岩屑狀，取通過 **30 號篩** 之粒料為主要製作原料，進一步再以 **200 號篩** 為區分粗細粒料之工具，(本研究定義之粗細粒料，以 200 號篩之 0.075mm 粒徑大小作為分界，大於此粒徑為粗粒料，反之則為細粒料)，以濕篩的方式取得細粒料，依鍾峻偉(2001)所建議，人造軟岩製作時的細粒料含量乃根據天然岩樣的粒徑分佈狀況所決定，將粗細粒料以 1:1 為其拌合比例。

膠結材

鍾峻偉(2001)以 200 號篩濕篩後的含細粒料水溶液作為一個膠結材的替代物，本研究採取其所建議之方式，亦使用濕篩後的含細粒料水溶液，不另外增添加膠結材。

水

決定了製作軟岩的基本材料以及粗細粒料的配比之後，拌合時所需的水的含量，則是另一個重點。一般而言，進行拌合時水的配比將會明顯大於最後所需要的含水量；若拌合時水的含量過少，不易均勻拌合而有結塊的現象，增加人造軟岩的不穩定性，且因為材料與模具之間的摩擦力影響，將會使得不均質的特性更加顯著；反之，若是拌合時水的含量過多，將會大大增加製作軟岩時所需要的排水時間，同時也容易使試體組成材料中細粒料部分流動至某些應力集中處，而非待在我們所預期的部位；過多的水將會使得拌合物如同泥漿一般，於製作過程中增加控制的困難度。

鍾峻偉(2001)經過一連串的試誤，建議按照比例秤取粗料重量與細粒料水溶液調配(粗細粒料約 1:1)，細粒料水溶液水的重量約佔總粒料重的 26%，其拌和工作度最佳，且成稠狀拌合物，有助於灌模工作的進行。

3.2.2 人造膠結不良砂岩製作方法與流程

由廖智偉(2003)製作方法的建議，經過小範圍調整改進一些步驟與程序，訂出本研究所使用之人造軟砂岩試體製作流程。以下說明軟岩製作方法及每個步驟程序：

儀器與架設

本研究於製作人造軟岩試體時主要所使用的壓密設備為油壓千斤頂、電動油壓泵、反力樑及其支撐架、荷重計、資料擷取系統及模具，如之前 3.1 節所述。

製作方法與流程

將整個人造軟岩試體製作過程分述如下，並參閱流程圖。(圖 3.17)

(1)取得岩樣

使用新竹縣寶山鄉寶山第二水庫工址之邊坡岩塊。

(2)岩樣處理

破碎岩塊進一步敲碎成最大粒徑約 3cm 之岩屑料，並進行氣乾。

(3)研磨岩屑

以榔頭敲碎、研磨氣乾後之岩屑，取通過 30 號篩之粒料作為主要原料。

(4)粒徑分析

必須與粗細粒料分離的初步程序相同，以供比對粗細粒料比例，粗料與細料的粒徑分佈必須進一步做篩分析與比重計分析。

(5)粗細粒料分離

為了節省濕篩的時間以及控制水的用量，先將粒料以 200 號篩乾篩，停留於 200 號篩上之粒料再以濕篩過 200 號篩作篩洗的動作，為了滿足洗淨度上的要求，倒入一定的水量後，以手均勻掏洗，直到掏洗後的水清澈為止。篩洗出的細粒料水溶液以容器承接收集，靜置沈澱，舀出多餘水分後可減少水的含量。粗粒料則

置入烘箱 24 小時。

(6)檢核決定拌和比

經由本程序所得到粒徑分佈與粗細粒料分離的結果極為相近，檢核的目的是為了確保若程序上有疏失，可馬上檢核出來。拌和比則可控制細粒料的含量，仍決定以接近天然軟岩之細料比例 50%，為拌和細粒料的比例。

(7)依比例拌和

按照比例秤取粗料重量與細粒料水溶液調配，細粒料水溶液水的重量約佔總粒料重的 26%。

(8)組裝模具

模具設計為長 600mm，寬 300mm，高 650mm 之長方體，以四片鋼製模板組立而成，模具內側以鋪保鮮膜 (PVDC memberane) 以減低側壁摩擦力，同時可減少模具生鏽的機率。

(9)灌模

拌和好之粒料填裝注入模具中，上下各放置不織布 (PPGS-3010) 以代替透水石充當透水材料與濾紙 (ADVANTEC-No.2) 防止細粒料流失。

(10)壓密

壓密設備示意圖 3.9，目標壓密荷重為 250 噸，選擇 250 噸的原因為壓密試驗曾以 300 噸製作試體，其壓密曲線如圖 3.10 所示，但發現 250 噸即已完成主要壓密，因此以後的試驗皆以 250 噸為目標壓密荷重，最大荷重壓密時間 6 天，為達目標荷重，分階加載，並在 1 天內加載到最大荷重(目標荷重)，如表 3.1 所示，經過測試，這是可充分完成的過程。試體上架壓密狀況如圖 3.11 所示。

(11)拆模氣乾

達到目標荷重與壓密時間的試體，卸載後拆除兩片長邊側模，而為了使每次承載試驗之圍束力量相同且束制良好，只拆除長邊兩面側模，寬邊側模不拆除。試體放置陰涼處氣乾，而氣乾時間控制在 3 週左右，如圖 3.12 所示。

表 3.1 分階加載的目標荷重和對應的時間

加載階數	荷重(ton)		備註
	壓密應力(kg/cm ²)	加載間隔時間	
1	10 (5.56)	-	第一天
2	16 (8.89)	1hr	第一天
3	25 (13.89)	1hr	第一天
4	34 (18.89)	1hr	第一天
5	46 (25.55)	1hr	第一天
6	60 (33.34)	1hr	第一天
7	80(44.47)	1hr	第一天
8	100(55.56)	1hr	第一天
9	120(66.67)	1hr	第一天
10	140(77.78)	1hr	第一天
11	180(100)	1hr	第一天
12	220(122.23)	1hr	第一天
13	250(138.89)	1hr	第一天
14	250(138.89)	2hr	第一天
15	250(138.89)	8hr	第二天
16	250(138.89)	8hr	第二天
17	250(138.89)	8hr	第三天
18	250(138.89)	8hr	第三天
19	250(138.89)	12hr	第三天
20	250(138.89)	24hr	第四天
21	250(138.89)	24hr	第五天
22	250(138.89)	24hr	第六天

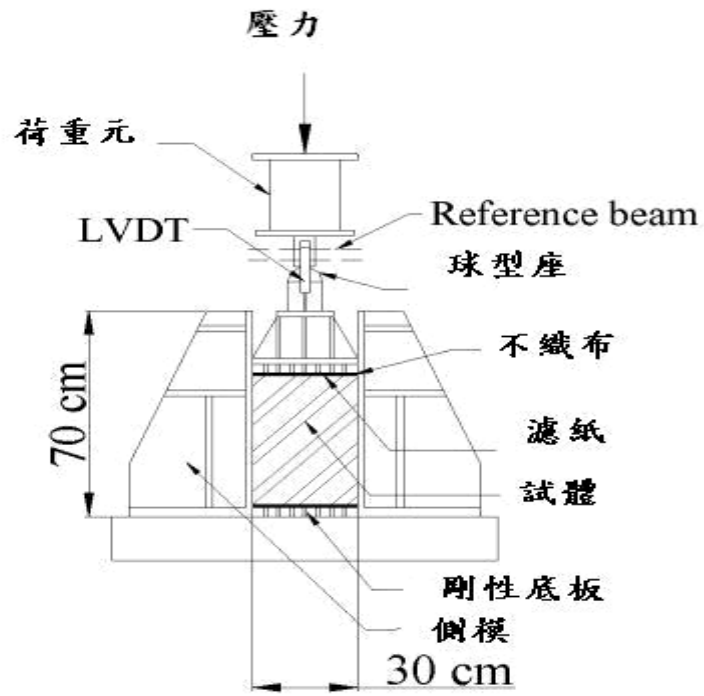


圖 3.9 壓密試驗設備示意圖

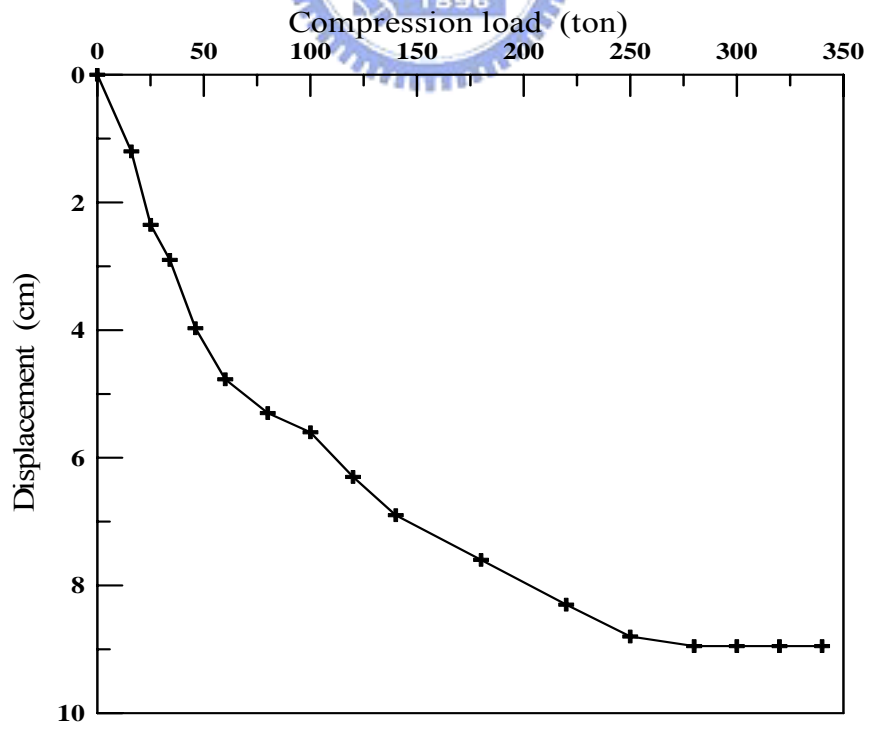


圖 3.10 人造膠結不良砂岩試體壓密曲線



圖 3.11 人造膠結不良砂岩壓密情形

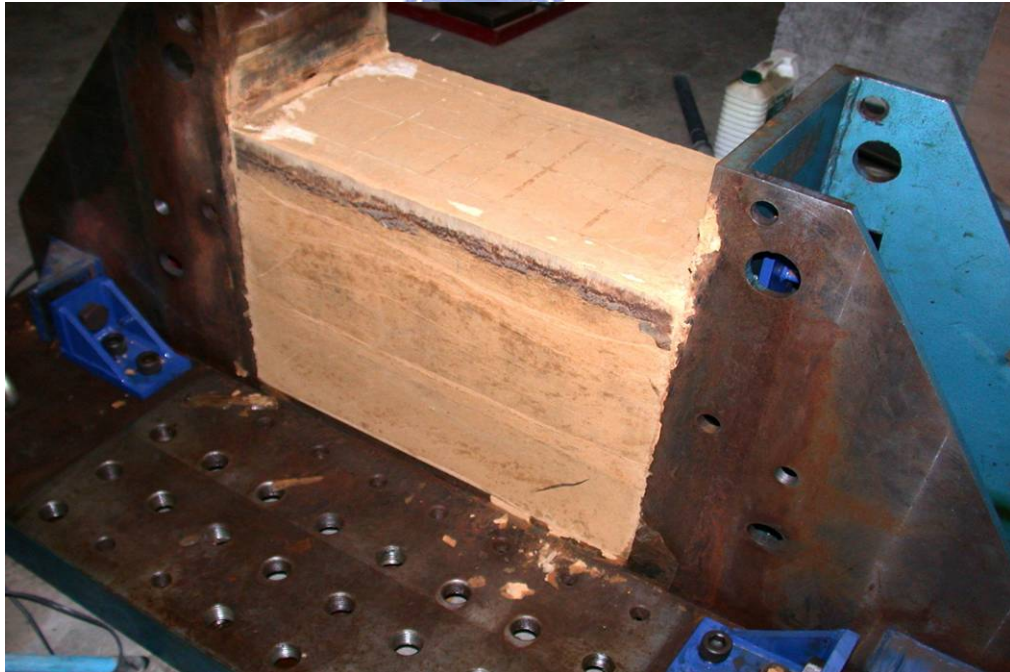


圖 3.12 人造膠結不良砂岩試體拆長邊模氣乾情形

(12) 修整試體、試體完成

氣乾 3 週以後，開始進行邊坡試體人工切割修整，先以砂輪機大槪磨切試體邊坡(圖 3.13)，在以刮尺刮平至所需邊坡角度(圖 3.14)，最後以磨平機修整試體表面(圖 3.15)，以利於之後繪製網格的施作，試體完成如圖 3.16。



圖 3.13 以砂輪機修整試體邊坡



圖 3.14 以刮尺修整試體



圖 3.15 以磨平機修整試體表面

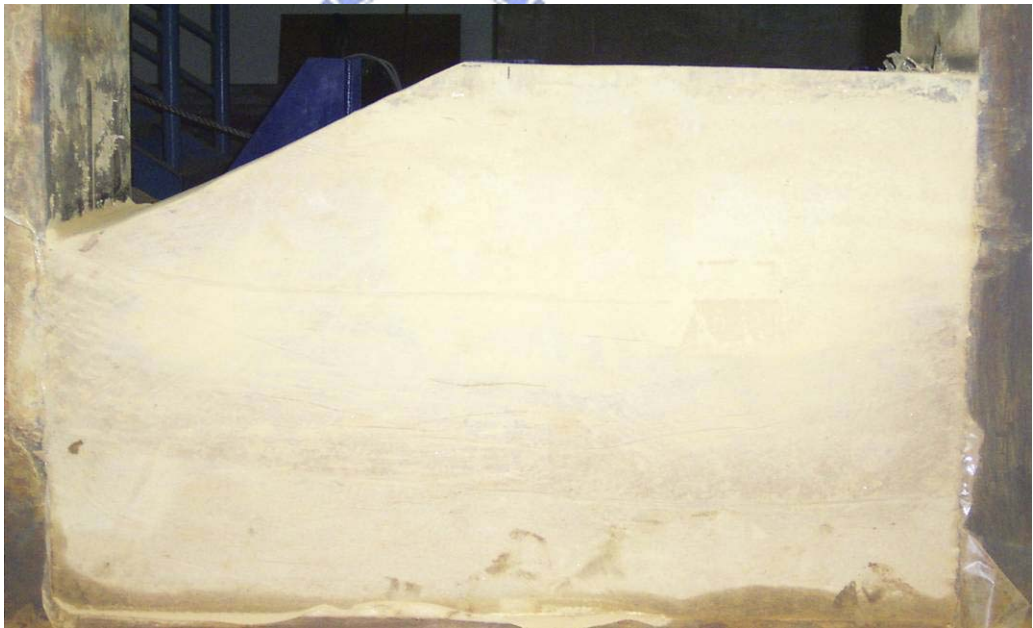


圖 3.16 人造膠結不良砂岩試體完成

表 3.2 為本研究和鍾峻偉(2001)、劉英助(2002)、廖智偉(2003)標準製程所製作人造膠結不良砂岩試體之條件比較。

表 3.2 人造膠結不良砂岩製作之條件及數目對照表

試體 編號	壓密天數 壓密荷重(ton)/ 壓密應力(kg/cm ²)	1 day	3 day	4 day	5 day	7 day	15 day
		本研究	250/138.89	-	-	-	12
廖智偉 (2003)	100/55.56	-	-	1	-	-	-
	250/138.89	-	-	6	-	-	-
劉英助 (2002)	100 / 55.56	—	—	1	—	—	—
	100 / 55.56	—	—	1	—	—	—
	160 / 88.89	—	—	1	—	—	—
	200 / 111.12	—	—	1	—	—	—
	80 / 44.45	—	—	1	—	—	—
鍾峻偉 (2001)	6.4 / 279	2	2	—	2	1	0
	8.0 / 349	5	3	—	3	1	1
	9.6 / 419	1	1	—	1	1	0

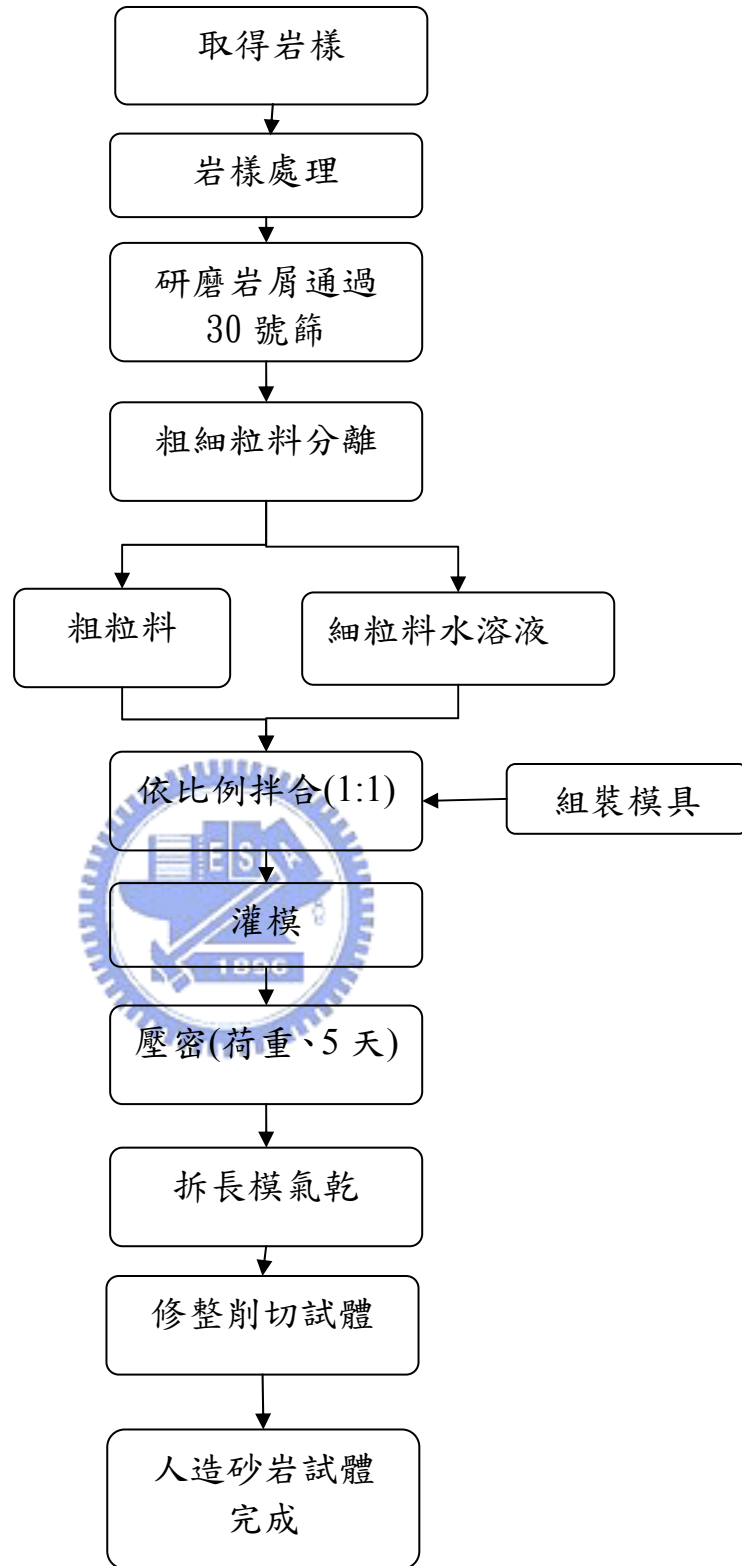


圖 3.17 人造膠結不良砂岩試體製作流程

3.2.3 模型相似律檢核

試體製作完成之後，透過泡沫鑽心取樣及一系列的物理試驗及力學試驗，進行無因次分析，將模數比(modulus ratio, E/σ_c)及強度比(strength ratio, σ_c/σ_t)最為主要檢核製作人造膠結不良砂岩成果的參考指標，另外以 ν 、 ε_f 、 ψ 原是具有物理意義的無因次項作為輔助參考指標。包含的物理試驗為求比重、密度、孔隙率，力學試驗則有單軸試驗及三軸試驗。詳細試驗步驟請參考劉英助(2002)。

而取樣位置(圖 3.18)，物性試驗使用之岩樣取自承載試驗施作後之人造膠結不良砂岩塊狀試體，分別從試體上表面、中表面、下表面、內部四個位置採取土樣，而取樣範圍是在岩塊的裂面 5cm~10cm 下之區域，將上部試體敲除約 20cm 後(圖 3.19、圖 3.20)，再以泡沫取鑽取出岩心(圖 3.21)，取出岩樣氣乾後經修整切削，在施作單軸壓縮試驗、三軸壓縮試驗及巴西試驗等試驗。

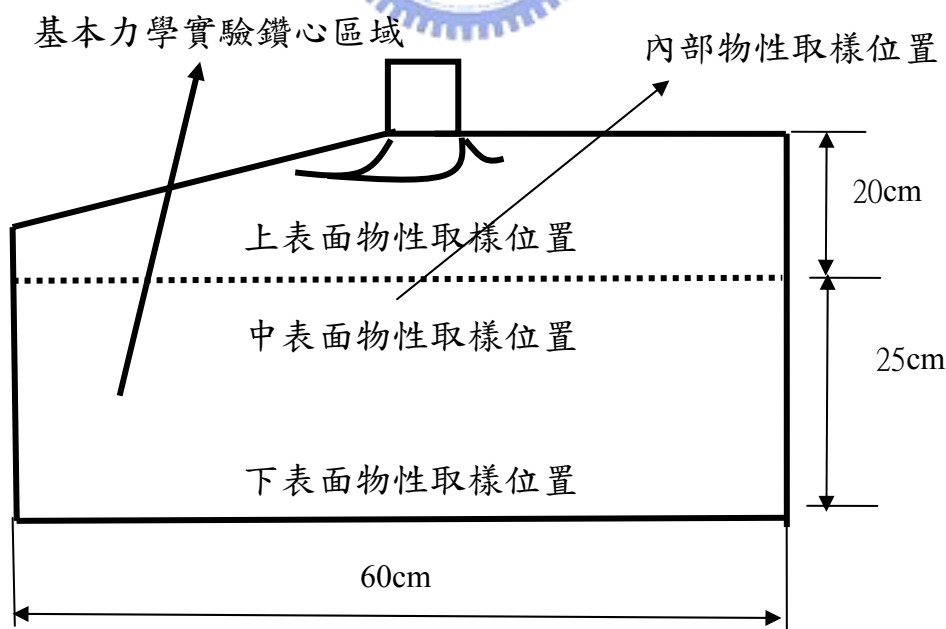


圖 3.18 鑽心取樣位置示意圖

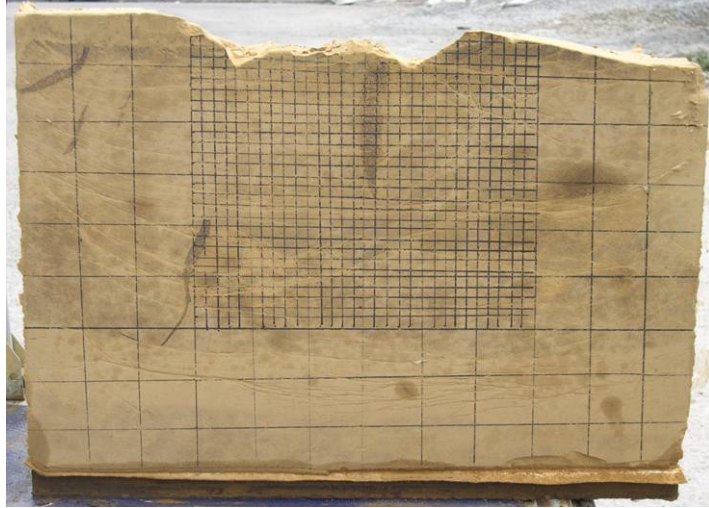


圖 3.19 試體原貌

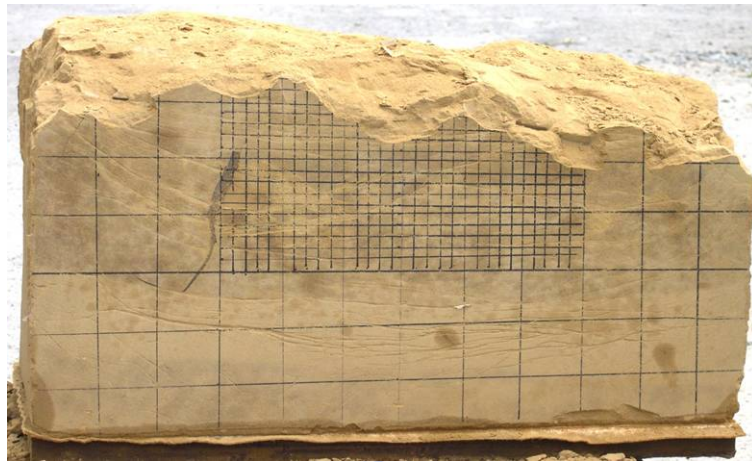


圖 3.20 清除破壞範圍後試體



圖 3.21 泡沫取鑽取出岩心

3.3 模型淺基礎承載試驗

本研究承載試驗主要為是模擬平面應變狀況之下長條形淺基礎模型承載行為，以之前製作之人造膠結不良砂岩為承載試體，基礎以一剛性鋼塊作為長條形模型基腳，並將試體繪上網格，側向束制良好，以模擬平面應變狀態。然後以 MTS-244.41S 採應變控制加載荷重，荷重透過剛性基腳施加於人造試體之上，並同時監測承載壓力與沉陷量，以得到承載曲線並觀察破壞行為。

3.3.1 試驗儀器之架設

本模型基礎承載試驗的主要施做儀器為交通大學土木結構試驗室內的 MTS-244.41S 動態壓力機，同 3.1 節所述。

模型淺基礎以長條型鋼條(50 mm × 300mm × 100mm)作為基腳，材料性質為 S45C 中碳鋼，其 E 值為 210GPa，相較本人造膠結不良砂岩材料(0.15~0.3 GPa)可視為一剛性基礎，施作承載實驗時在模型基腳上鎖上一球型座以防止荷重傳遞偏心。圖 3.22 為將剛性基礎鎖上球型座後置於試體上之照片。表 3.3 為本研究基腳和不同強度混凝土的彈性模數值。相對於基礎材料，本研究採用的鋼材或混凝土基腳皆可視為剛性基腳。

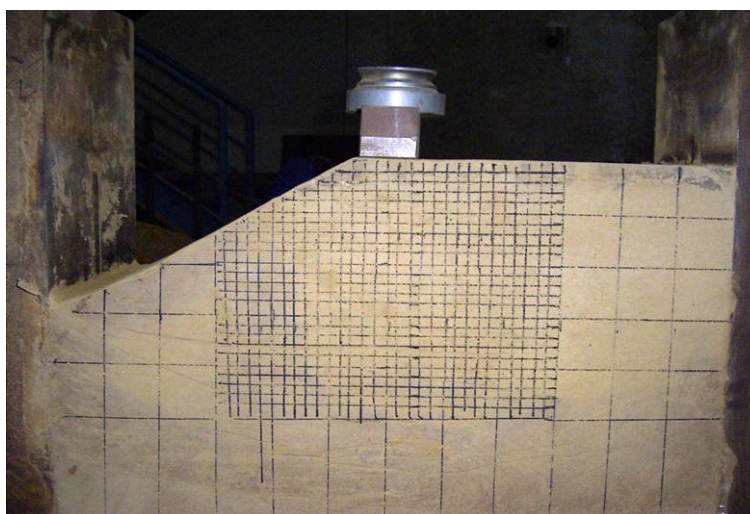


圖 3.22 剛性基礎鎖上球型座後置於人造膠結不良砂岩試體

表 3.3 本研究材料和建築用混凝土之彈性模數值

材料名稱	彈性模數
本研究之人造軟岩	0.15~0.3 GPa
本研究之模型基腳 S45C	210 GPa
3000psi 混凝土	21.68 GPa
6000psi 混凝土	30.65 GPa

組裝完試驗盒後將監測儀器兩支 LVDT 置於基礎的兩側，並為了確保 LVDT 本身不會因實驗過程有所移動，放置於獨立於系統外之參考樑上，用以監測基礎之沉陷量，LVDT 量測位置示意圖如圖 3.23 所示，整體量測系統如圖 3.24、圖 3.25 所示

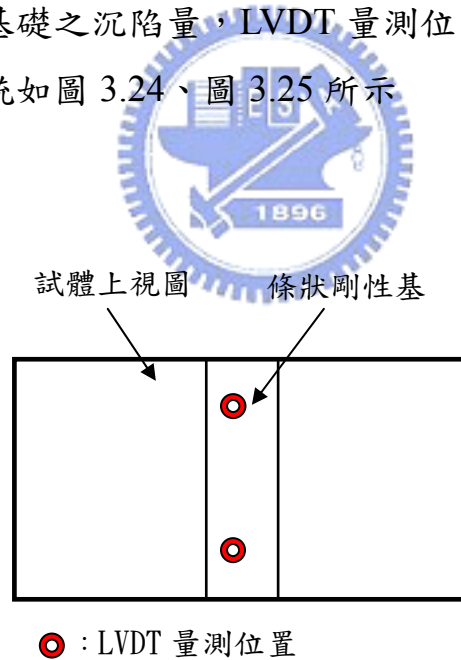


圖 3.23 LVDT 量測位置示意圖



圖 3.24 LVDT 量測系統之整體照

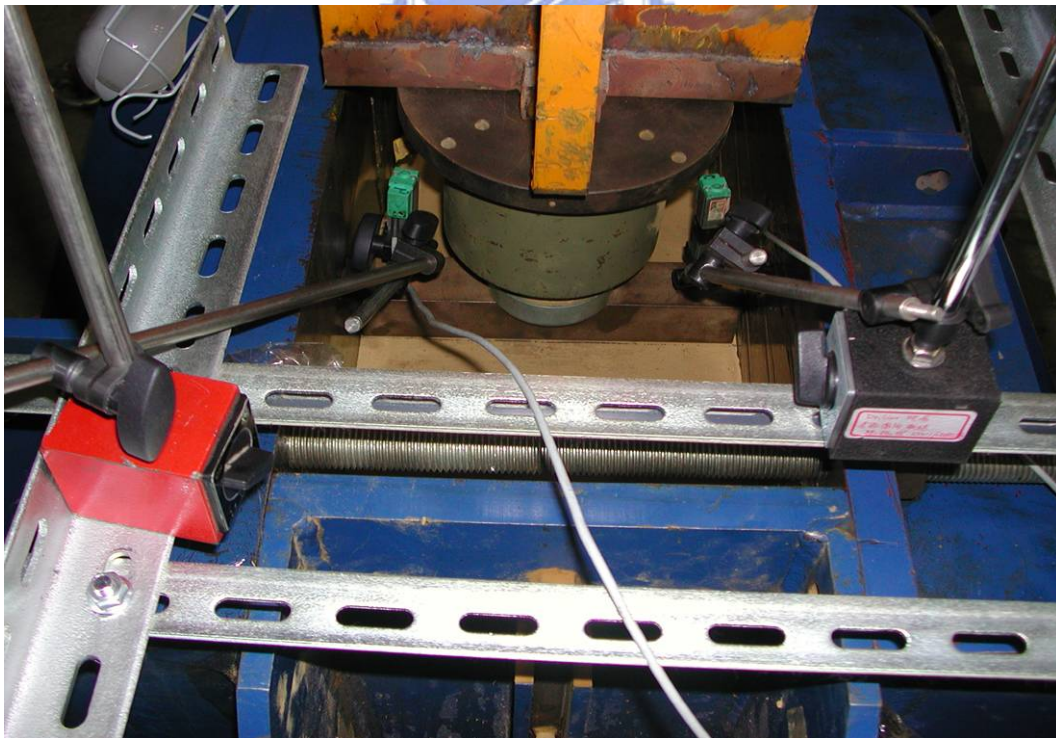


圖 3.25 LVDT 量測系統之位置近照

以其中一承載試驗所量得的數據為例，圖 3.26 為兩支 LVDT 置於獨立承載實驗系統外的參考樑在基腳前後和 MTS 所量到的沉陷量比較圖，可以發現三個沉陷量讀數相差不到 1mm，在達到承載曲線極限點時，基腳的沉陷量皆約為 8mm 左右，而過了承載極限點，因為伴隨邊坡的效應，基礎可能有滑動，因此造成前後兩支 LVDT 有較大的差值。本研究承載曲線的承陷量 S 以 LVDT 平均所量到的數據進行分析。

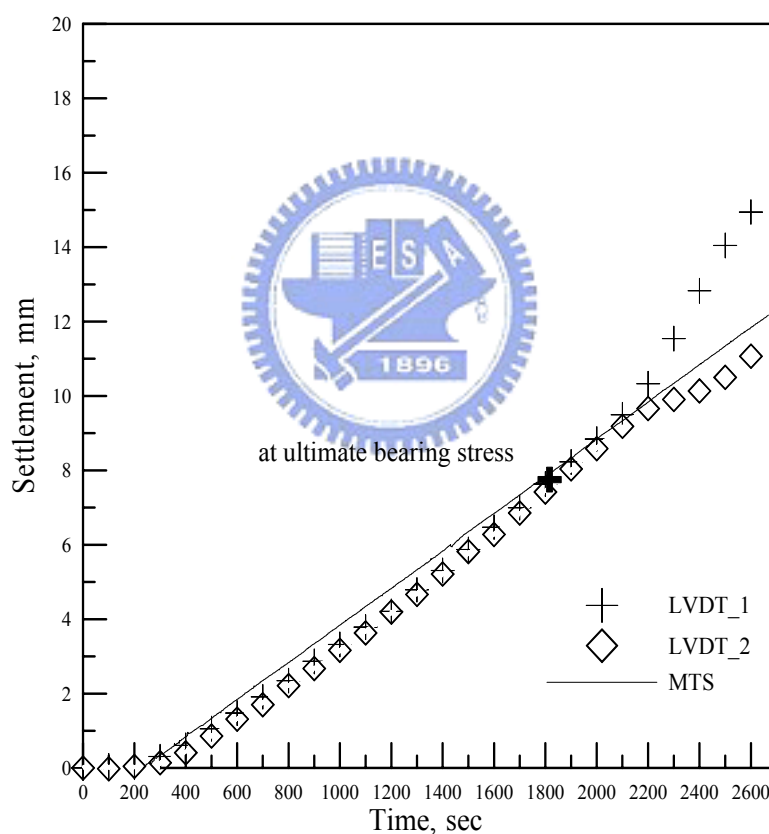


圖 3.26 基腳 LVDT 和 MTS 量測沉陷量比較圖

3.3.2 試驗方法與流程

在整個承載試驗施作的規劃上，為了能較正確地模擬平面應變狀態，必須對人造膠結不良砂岩試體表面進行修整，但又需擔心矯枉過正，將試體修整過多，導致側向束制條件不符理想而無法有效模擬平面應變狀態。為此，在試驗之模具設計上，以夾具之方式，使用四根螺桿將試體與模具緊密結合，以達到模擬平面應變之狀態。

本試驗考慮承載試驗的邊界影響，一般承載行為所造成之破壞面，其影響的範圍與深度分別為基腳寬度之 6 倍與 4 倍。簡宜嫻(2002)也曾探討承載實驗邊界效應問題，探討當筏基 (D) 對於材料的寬度 (W) 比值分別為 5 倍、10 倍、15 倍、20 倍，得知當基礎材料邊界值大於筏基 10 倍以上，筏基對基礎材料整體的位移差異已經有限。亦即試體尺寸為 600 mm(長) × 300mm(寬) × 450mm(高)，所以基腳寬度(D)選擇 50mm 以符合邊界條件及尺寸效應的要求(圖 3.27)。

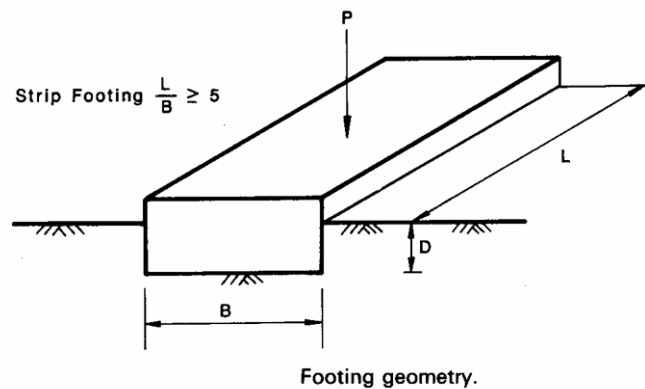


圖 3.27 基礎模型幾何形狀示意圖

主要的承載試驗流程說明如下，並參閱流程圖，如圖 3.28 所示：

(1)人造膠結不良砂岩試體製作修整：

由上一節所建議之方式及流程，製作提供承載試驗之試體。

(2)繪製網格：

於模擬平面應變的平面上，尤其是在基礎下方處繪製網格，如圖 3.29 所示，以基礎中央 30cm 內畫 1cm×1cm 為一方格，基礎中央 30cm 外畫 5cm×5cm 為一方格，以便觀察基礎於承載試驗過程中，觀察網格變位的情形，以做定性上的描述。

(3)模具組立：

將兩片長邊側模重新組立，並以四根螺桿上下夾緊以提供承載試體的束制良好。因本承載試驗為模擬平面應變狀況，試驗箱兩側壁為應為無摩擦阻抗，但試體與試驗盒鋼側壁為兩種不同材料互相接觸，必定存在於摩擦效應問題，所以在長邊側模塗潤滑油（silicone grease, Shin-Etsu G501）和以保鮮膜(PVDC memberance)裹覆，用以減低試體和鋼壁間的摩擦力，如圖 3.30 所示。

(4) 監測儀器、攝影工具及條形基礎模型架設：

將所需的已校正過之量測儀器，包含 5cm LVDT 兩支，架於基礎上，量測基腳前後的沉陷，以及利用基礎上之荷重計，測量承載壓力。將承載過程中的拍攝的數位相機以三角架架設於觀察窗前，承載實驗過程中每 30 秒攝影一次，以供試驗完後的分析觀察。

(5)承載試驗施作：

試驗盒置於 MTS-244.41S 下方，經參考各種力學試驗多以 0.3mm/min 為定應變加載，故決定以 0.3mm/min 之定應變速度將剛性基礎向下壓，當承載力明顯下降即試體破壞，承載試驗立即停止。

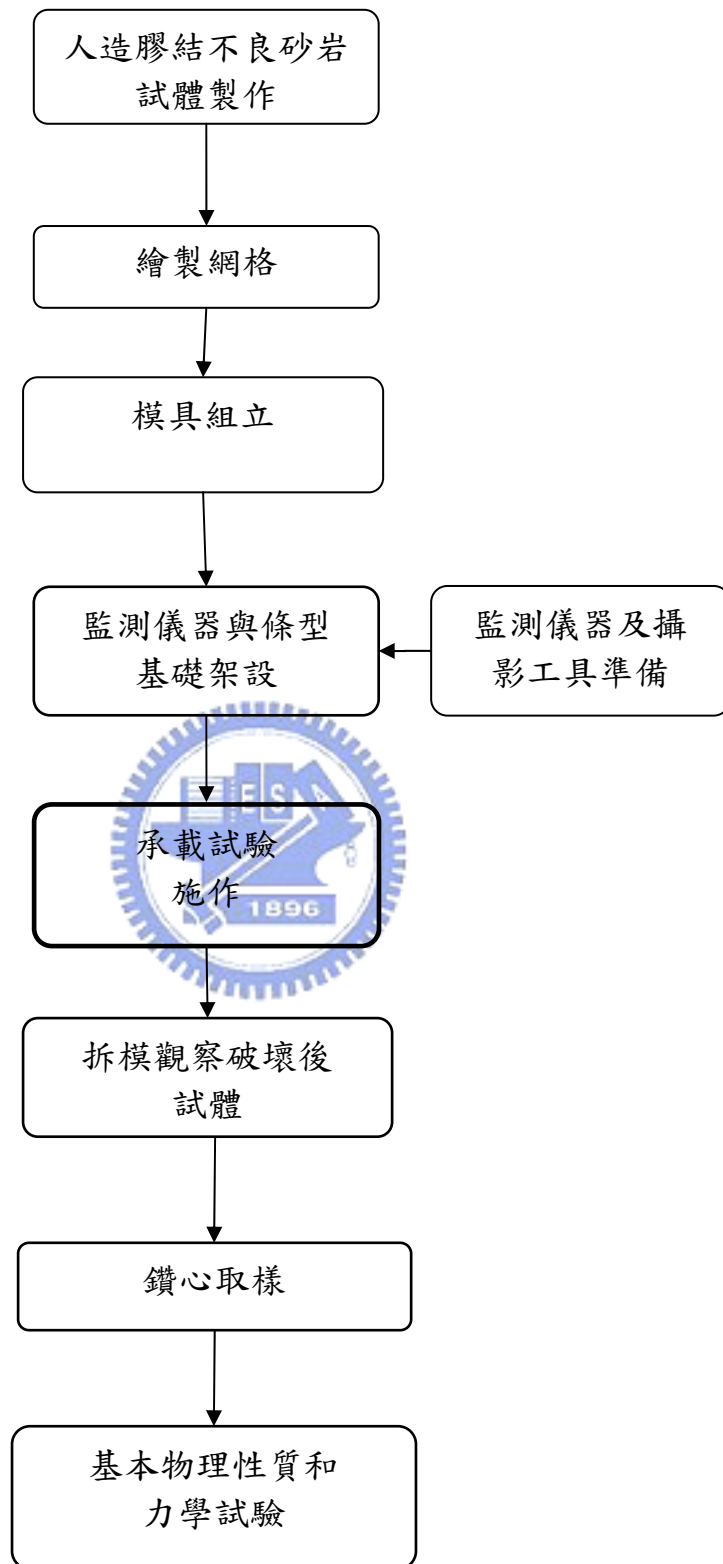


圖 3.28 承載試驗流程示意圖

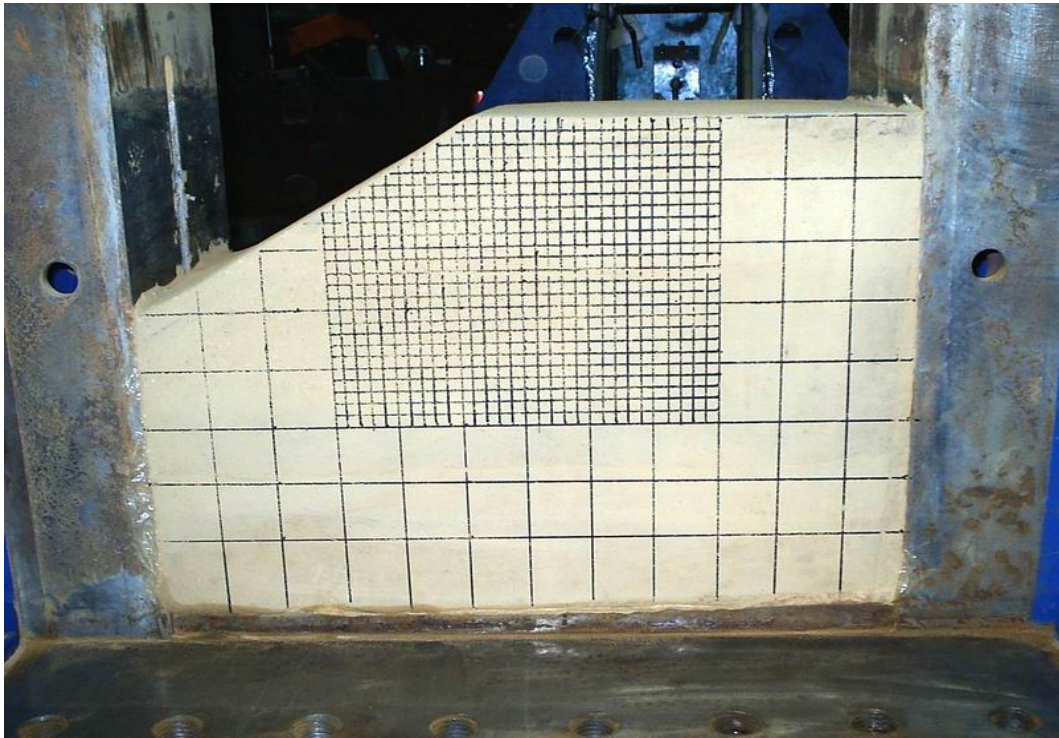


圖 3.29 網格繪製示意圖



圖 3.30 側壁和試體間減低摩擦力方法之示意圖