

行政院原子能委員會放射性物料管理局

106 年用過核子燃料處置長期安全評估

審驗技術之研究

子項計畫三：緩衝材料飽和回脹

與熱-水耦合特性試驗技術研析

期末報告

受委託單位：社團法人中國土木水利工程學會

子計畫主持人：鐘志忠

業務委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局

計畫編號：105FCMA010

中 華 民 國 一 〇 六 年 十 二 月

106 年用過核子燃料處置長期安全評估
審驗技術之研究

子項計畫三：緩衝材料飽和回脹
與熱-水耦合特性試驗技術研析

受委託單位：社團法人中國土木工程學會

研究主持人：黃偉慶

協同主持人：鐘志忠

研究期程：中華民國 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新台幣陸拾柒萬玖仟伍佰壹拾貳元整

行政院原子能委員會放射性物料管理局 委託研究

中華民國 106 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

摘要

先進核能國家一致認同將用過核子燃料進行深層地質處置是目前解決高放射性廢棄物最可行的方法，而其用過核子燃料深層處置場之近場組成包括廢棄物包件、緩衝材料、回填材料等工程障壁，以及相鄰岩體。其中工程障壁材料如緩衝材料及回填材料屬於土石材料，其受水分入侵時之行為與所處環境溫度場相關。此外，由於各工程障壁元件皆緊密圍束於處置坑及連通隧道內，其力學行為亦受環境溫度及水分所影響，故對熱-水力-力學 (T-H-M) 耦合作用相關課題進行研究，其重點分成三個部份。第一部分為國外緩衝材料相關性質收集與彙整，針對國外 T-H-M 階段性報告進行研析；第二部分為緩衝材料回脹特性初步分析，對不同模擬環境下緩衝材料回脹行為的表現，第三部分為改善小型熱-水耦合室內試驗模型，並透過試驗初步觀察緩衝材料之熱-水耦合效應。盼能有助於用過核子燃料最終處置計畫之工程障壁相關審查工作。

目錄

目錄.....	iii
圖目錄.....	vii
表目錄.....	xv
1. 第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究方法.....	2
1.3 研究目的.....	2
2. 第二章 文獻回顧.....	3
2.1 深層地質處置設計概念.....	3
2.2 各國處置場現況.....	5
2.3 日本模擬試驗.....	8
2.3.1 模擬試驗概要.....	8
2.3.2 試驗材料、配置.....	10
2.3.3 日本模擬試驗結果.....	18
2.4 瑞典模擬試驗.....	20
2.4.1 瑞典試驗概要.....	20
2.4.2 試驗材料、配置.....	21

2.4.3	模擬試驗結果	24
2.5	中國模擬試驗	30
2.5.1	模擬試驗概要	30
2.5.2	模擬試驗材料、配置	31
2.5.3	模擬試驗結果	34
2.6	西班牙模擬試驗	41
2.6.1	模擬試驗概要	41
2.6.2	試驗配置、材料	41
2.6.3	模擬試驗結果	45
2.7	芬蘭模擬試驗	48
2.7.1	模擬試驗概要	48
2.7.2	試驗配置、材料	49
2.7.3	模擬試驗結果	50
3.	第三章 回脹壓力試驗	55
3.1	實驗介紹	55
3.2	實驗材料、試體	57
3.3	實驗儀器配置、方法	59
3.3	試驗結果	62
4.	第四章 小型熱-水耦合試驗	71

4.1 實驗材料、試體	71
4.2 實驗設備	73
4.3 實驗配置、方法	74
4.4 試驗結果	82
5. 第五章結論與建議審查重點	103
5.1 結論.....	103
5.2 建議審查重點或注意事項	104
6. 參考文獻.....	105

圖目錄

圖 2.1 日本深地層處置場多重障壁概念圖	4
圖 2.2 各國處置場進展和比較	7
圖 2.3 日本處置場設施位置圖	9
圖 2.4 現地處置隧道圖	9
圖 2.5 緩衝材料塊製作圖	11
圖 2.6 日本模擬試驗配置圖(側面)	12
圖 2.7 日本模擬試驗配置圖(俯視)	12
圖 2.8 處置罐構造圖	13
圖 2.9 模擬熱源組件	14
圖 2.10 加熱器	14
圖 2.11 感測位置配置圖	16
圖 2.12 熱源熱電偶感測器位置圖	17
圖 2.13 進水系統施工圖	17
圖 2.14 進水系統配置圖	18
圖 2.15 日本模擬實驗位移傳感器結果	18
圖 2.16 日本模擬試驗第 5 層溫度分佈	19
圖 2.17 日本模擬試驗第 5 層飽和度歷時變化	19
圖 2.18 大型試驗配置	20

圖 2.19 瑞典實驗配置.....	22
圖 2.20 實驗外觀.....	22
圖 2.21 傳感器配置.....	23
圖 2.22 加熱器在實驗容器中.....	23
圖 2.23 緩衝材料內的裂紋.....	24
圖 2.24 在角度 10 度的含水量分佈圖.....	25
圖 2.25 在角度 10 度之乾密度分佈圖.....	25
圖 2.26 在角度 190 度之含水量分佈圖	26
圖 2.27 在角度 190 度之乾密度分佈圖	26
圖 2.28 三種幾何試驗模型.....	27
圖 2.29 在 120 天後三種模型的含水量輪廓圖	27
圖 2.30 溫度模擬和實驗比對結果.....	29
圖 2.31 中國模擬試驗概念圖.....	30
圖 2.32 中國模擬試驗之實驗室.....	31
圖 2.33 中國模擬試驗配置圖.....	32
圖 2.34 中國模擬試驗緩衝材料組塊.....	32
圖 2.35 中國模擬試驗感測器配置圖.....	33
圖 2.36 中國模擬試驗進水歷程.....	34
圖 2.37 第 II 層溫度變化 (T5 在 280 天後停止運作)	34

圖 2.38 第 III 層溫度變化.....	35
圖 2.39 第 I 層相對濕度變化	36
圖 2.40 第 III 層相對濕度變化.....	36
圖 2.41 第 VII 層相對濕度變化.....	37
圖 2.42 I 層壓力變化	38
圖 2.43 加熱器垂直位移變化.....	38
圖 2.44 不同位置之溫度預測和實驗比對結果.....	39
圖 2.45 不同位置之濕度預測和實驗比對結果.....	40
圖 2.46 西班牙現地試驗配置圖.....	42
圖 2.47 西班牙大型模擬試驗配置圖.....	43
圖 2.48 現地試驗具傳感器 3.5CM 相對濕度變化（位置參照 圖 2.48）	45
圖 2.49 大型模擬試驗(SECTION A4)相對濕度變化.....	45
圖 2.50 實驗室試驗 8CM-CELL 含水量及乾密度變化.....	46
圖 2.51 溫度距加熱器距離變化.....	47
圖 2.52 芬蘭處置概念.....	48
圖 2.53 芬蘭模擬試驗儀器配置.....	49
圖 2.54 不同時間之飽和度（乾密度 1650 KG/M ³ ，飽和度 35%）	50

圖 2.55 不同時間之飽和度 (乾密度 1745 KG/M ³ , 飽和度 35%)	50
圖 2.56 不同時間之飽和度 (乾密度 1645 KG/M ³ , 飽和度 90%)	51
圖 2.57 不同時間之直徑變化量 (乾密度 1650 KG/M ³ , 飽和度 35%)	52
圖 2.58 不同時間之直徑變化量 (乾密度 1745 KG/M ³ , 飽和度 35%)	52
圖 2.59 不同時間之直徑變化量 (乾密度 1650 KG/M ³ , 飽和度 90%)	53
圖 2.60 不同時間之直徑變化量 (乾密度 1745 KG/M ³ , 飽和度 90%)	53
圖 3.1SKB 回脹壓力試驗 (A0 軸向、R1 逕向向外、R2 逕向向內).....	55
圖 3.2 膨潤土試體壓製模具.....	58
圖 3.3 膨潤土試體壓實流程.....	58
圖 3.4 回脹壓力與水力傳導試驗示意圖	59
圖 3.5 荷重元與資料顯示器.....	59
圖 3.6 試驗配置圖	60

圖 3.7 附載荷重之單向度回脹試驗示意圖	61
圖 3.8 單向度回脹試驗儀器	61
圖 3.9 典型回脹壓力歷時曲線 (SPV 200 BENTONITE 1600 KG/M ³)	62
圖 3.10 壓實膨潤土之定體積回脹過程 (ZHU, 2013).....	63
圖 3.11 不同水-熱近場環境下緩衝材料回脹壓力歷時曲線	63
圖 3.12 65°C 水-熱環境後之外觀 (側面產生裂縫)	64
圖 3.13 不同 NaCl 濃度之回脹壓力歷時曲線.....	64
圖 3.14 不同 CaCl ₂ 濃度之回脹壓力歷時曲線.....	65
圖 3.15 不同 NaOH 濃度之回脹壓力歷時曲線	66
圖 3.16 膨潤土於 Ca(OH) ₂ 之回脹壓力歷時曲線.....	67
圖 3.17 膨潤土於 25 度水系統中不同垂直應力之回脹歷時曲 線.....	68
圖 3.18 膨潤土於 NaCl[0.6M]系統中不同垂直應力之回脹歷 時曲線.....	69
圖 3.19 膨潤土於 NaCl[0.6M]系統中不同垂直應力之回脹歷 時曲線.....	69
圖 4.1 試體俯視示意圖(未按比例).....	72
圖 4.2 壓桿、分裂模內模組合圖.....	72

圖 4.3 TDR1500	73
圖 4.4 RG58- A/U 同軸線	73
圖 4.5 真空凡士林	74
圖 4.6 實驗設計配置圖	75
圖 4.7 試體分層含水量計算概念	75
圖 4.8 分層含水量計算	76
圖 4.9 感測器改良	77
圖 4.10 不同溫度之 14%含水量 TDR 波型頻散情形	79
圖 4.11 不同溫度之 24%體積含水量 TDR 波型頻散情形 ..	80
圖 4.12 不同溫度之 34%體積含水量 TDR 波型頻散情形 ..	80
圖 4.13 (A)保鮮膜 COATING (B)熱縮管 COATING	81
圖 4.14 保鮮膜絕緣感測器視介電常數-溫度關係曲線	82
圖 4.15 保鮮絕緣膜感測器測得膨潤土之含水量-視介電常數 -溫度三相圖	83
圖 4.16 熱縮管絕緣感測器視介電常數-溫度關係曲線	83
圖 4.17 熱縮管絕緣感測器測得膨潤土之含水量-視介電常數 -溫度三相圖	84
圖 4.18 不同感測器建立之 SPV200 膨潤土視介電常數-溫度 關係曲線	85

圖 4.19 TDR 感測器配置圖.....	86
圖 4.20 試體浸水試驗.....	86
圖 4.21 25 度體積含水量歷時曲線.....	87
圖 4.22 25 度分層體積含水量歷時曲線.....	88
圖 4.23 25 度系統浸水 120 HR 之試體剖面	89
圖 4.24 40 度體積含水量歷時曲線.....	90
圖 4.25 40 度分層體積含水量歷時曲線.....	91
圖 4.26 40 度系統浸水 120 HR 之試體剖面	92
圖 4.27 60 度體積含水量歷時曲線.....	93
圖 4.28 60 度分層體積含水量歷時曲線.....	94
圖 4.29 60 度系統浸水 240 HR 之試體剖面	94
圖 4.30 軸對稱模型邊界條件設定.....	95
圖 4.31 25 °C、40 °C、60 °C 系統浸水 120 HR 之飽和度.....	97
圖 4.32 模擬 25 度溫度系統浸水 120 HR 之體積含水量歷時 變化.....	97
圖 4.33 模擬 40 度溫度系統浸水 120 HR 之體積含水量歷時 變化.....	98
圖 4.34 模擬 60 度溫度系統浸水 120 HR 之體積含水量歷時 變化.....	98

圖 4.35	25 °C、40 °C、60 °C系統 0~0.1 M 之相對位移變化	99
圖 4.36	模擬 25 度溫度系統之位移量歷時變化	100
圖 4.37	模擬 40 度溫度系統之位移量歷時變化	100
圖 4.38	模擬 60 度溫度系統之位移量歷時變化	101
圖 4.39	25 °C、40 °C、60 °C系統 0~0.1 M 之孔隙比變化..	102

表目錄

表 2-1 各國處置場規格與處置方法.....	6
表 2-2 日本耦合試驗材料表	10
表 2-3 感測器配置圖	15
表 3-1SPV 200 膨潤土成份分析表	57
表 4-1 TDR 感測器改良製作過程.....	78

第一章 緒論

1.1 研究動機

核電廠反應器產生之用過核子燃料具有高度放射性，其中部分核種壽命長達千年甚至到十萬年以上，而透過高放射性廢棄物作用所產生的衰變熱，長期形成一定範圍的溫度場效應，為不使放射性廢棄物影響到自然環境，高放射性廢棄物之管理方法多年來一直是國際間關注的焦點，而如何有效安全及長期處置高放射性廢棄物成為使用核能國家共同研究討論的環保議題。國際間目前一致採用「深層地質處置」的方式，以多重障壁的設計，將用過核子燃料埋置於地下數百公尺深的穩定地層中，利用廢棄物包件、工程障壁及周圍岩層等將廢棄物層層保護，使之與人類生活環境完全隔離。各核能發展先進之國家如美國、日本、瑞典、中國等，均積極研究其相關的處置技術。

根據我國「放射性物料管理法施行細則」第4條定義，指用過核子燃料或經過再處理所產生之萃取殘餘物，但我國現有於高放射性廢棄物處理上並未經過再處理之程序，因此我國高放射性廢棄物即是用過核子燃料。針對用過核子燃料之最終處置場建置，我國對放射性核廢料管理策略以技術、安全、經濟、政治、人文社會及自然環境等六大因素規劃近、中、長程計畫，近程採用廠內燃料池貯存；中程則進行乾式貯存；長程以最終處置作為我國之管理策略。

深地層處置設施中，其影響範圍依廢棄物衰變熱與放射性影響區域分為近場、遠場、生物圈，當中以近場受到的影響最大，近場包括廢棄物的處置孔或隧洞內之緩衝材料、回填材料、開挖擾動區及外圍接觸的母岩；未受到衰變熱及放射性影響的區域部分稱為遠場或地質圈，而人類與其他生命有機體居住的環境則稱為生物圈。

高放射性廢棄物深地層處置場的近場與遠場演化程序，主要受到四大因素所影響，包含熱學(Thermal, T)、水力(Hydraulic, H)、力學(Mechanical, M)、化學(Chemical, C)，簡稱為 T-H-M-C 耦合效應，其中單一因素或複雜的耦合交互作用

進而影響最終處置場之預期功能。因此，雖然國際間對於處置場之研究設計相關研究甚多，但考慮各國處置環境不同，難以將其國外研究成果直接應用，故建立符合國內適合的環境與最終處置場耦合影響過程的研究，具有不可替代的必要性。

1.2 研究方法

近場 T-H-M-C 效應對於處置場的完整功能性具有相當重要性，然而目前各國對於此四項耦合效應的試驗尚未發展完善，因其中化學效應參與反應的因子及條件極為複雜，難以在短時間內有效理解，因此透過國際間合作關係，國內目前均集中致力於 T-H-M 耦合效應的實驗及數值模擬。

本子計畫擬定透過實驗室之物理模型試驗，以膨潤土為研究材料，建立小型 T-H 耦合模型，以模擬深地層處置地下水環境下緩衝材料相關性質及近場溫度分佈，針對緩衝材料配置不同狀態實驗以模擬現實處置場現況，以取得適合國內相關參數，作為有限元素分析之重要參數，供未來國內處置計畫細部設計之參考依據。

1.3 研究目的

本子計畫首先將透過文獻回顧，以掌握目前國際間用過核子燃料深層地質處置之工程障壁設計及材料特性要求，同時針對各國材料特性及其於 T-H-M 耦合作用下之行為加以分析整理，供國內深地層最終處置緩衝材料考量，部分資料並可提供其他子計畫有限元素模型分析參考運用。

本子計畫延續105年「用過核子燃料處置安全審驗技術國際資訊研析」子項計畫二：「深層地質處置設施多孔配置之近場效應分析」，考量緩衝材料受衰變熱處於乾燥狀態至地下水入侵始知之逐漸飽和，另外也考量回填材料自重及回脹壓力影響，緩衝材料將遭受垂直向下之應力 本子計畫透過回脹試驗研究及單向度試驗針對緩衝材料在不同環境下的回脹能力，並且透過建立三相圖，及之熱-水耦合模型模擬緩衝材料在處置時耦合情形，完成緩衝材料熱-水耦合試驗。

第二章 文獻回顧

2.1 深層地質處置設計概念

針對用過核子燃料(高放射性廢棄物)，深地層處置為國際間核能先進國家對放射性廢棄物最終管理較推崇之方式，依照影響範圍之環境分為近場、遠場、生物圈，其近場(near field)包含廢棄物處置坑室、隧道、緩衝區與回填區、開挖擾動區及周圍接觸母岩，此部分皆為用過核子燃料衰變熱與輻射影響所及區域；遠場(far field)或地質圈(geosphere)則為處置區域外圍未受衰變熱與輻射侵擾的基岩部分；生物圈(biosphere)為人類與其他生命有機體居住之環境稱之。

日本深地層處置場多重障壁概念圖，如圖 2.1所示，其設計理念為選取足夠體積且完整的岩體，於適當之深度鑽鑿坑道，將固化處理後之放射性廢棄物，利用廢棄物包件、緩衝材料、回填材料及周圍岩層等組成多重障壁系統(multi-barrier system)，於高放射性廢棄物四周加以圍阻，構成近場的一部份。其功能以阻絕、延遲放射性廢棄物外釋或影響地下環境，達到將放射性廢棄物永久隔離生物圈之目的。在用過核子燃料經處理後，裝填於廢棄物罐，藉以提供足夠強度與抵抗外部侵蝕能力保護內部廢棄物體，也可防止核種外釋至自然環境中。接著將廢棄物罐運送至處置場址，利用豎井輸送至地下至少300公尺或更深處已開挖好的岩體處置坑中，在將廢棄物罐嵌入前，處置坑內事先已襯填好夯實的膨潤土塊(處置坑底部)與膨潤土圈(環繞於廢棄物罐周圍)，嵌入廢棄物罐後再利用膨潤土塊填滿處置坑。此項介於處置基岩與廢棄物罐間之系統稱之為緩衝材料(buffer)，具有防止侵蝕性物質直接侵蝕廢棄物罐，以及減緩廢棄物罐內核種釋出等功能，在設計使用年限內，確保廢棄物與外部環境完全隔離。當處置工作完成後，工作坑道與豎井將會利用膨潤土與碎石混合料填充，以維持處置場的穩定性。

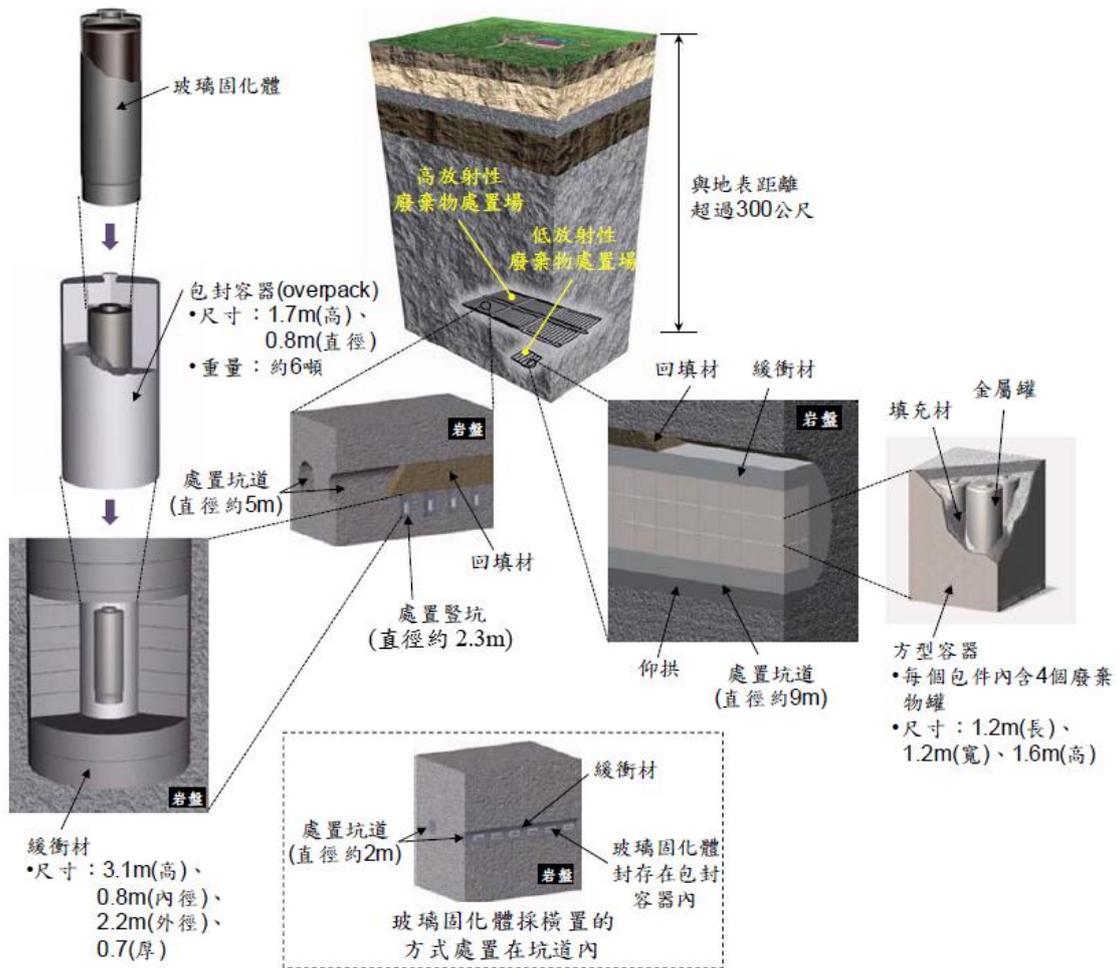


圖 2.1 日本深地層處置場多重障壁概念圖

2.2 各國處置場現況

用過核子燃料即具有高放射性的核廢料，會對人體嚴重危害，及對生物圈產生影響，因此需要長期遠離我們的生活環境，而目前「深地層處置」為國際間選擇較為適當的處置方法，彙集國外處置場相關經驗當中，即便各國以長期管理放射性廢棄物為共同的目標，也會因為每個國家的文化、政治、歷史和所屬地方的地質環境情況下，而有不同的計劃過程及設計規劃。因此，彙整各國家對於用過核子燃料之最終處置發展現況、掌握最新動態及消息，為達成最終安全長期管理放射性廢棄物目標之必要程序與步驟。

目前各國對於用過核子燃料（高放射性廢棄物）提出之長期管理政策，多以深地層處置為處置目標（深度多介於300~1000公尺）；且考量天然障壁功能性不同而選擇結晶岩類、沉積岩類或鹽岩。目前各國均積極進行現地試驗工作，一方面取得現地參數，另一方面可驗證實驗室模式預測結果。

彙整各國處置場規格與處置方法，在處置場工程障壁方面，除了英國與德國，其他國家皆使用純膨潤土或膨潤土混合不同比例的砂石製作緩衝材料與回填材料；而在處置場的位置設置方面，各國最終處置場預定的處置深度大約在300~1000公尺處，除了美國之外，其他國家的處置場位置皆在飽和基岩帶。在各國的處置概念中，以瑞典的KBS-3 概念發展較早且成熟，且該國之用過核子燃料特性與規模亦較近似我國，加上其研發過程之相關技術文獻亦較為完整詳盡，因此國內深層處置場設計概念係以瑞典KBS-3 處置概念為參考對象；另外日本其地質環境特性與我國類似，且研究發展規劃相當完整，亦值得我國學習參考。

表 2-1 各國處置場規格與處置方法

國家	廢料類別	冷卻(年)	廢料處理方式	廢料罐/包封材料	緩衝材料	回填材料	封存方式	深度(m)	處置地質環境	處置場設計	處置罐裝方式
比利時	用過核子燃料 高放射性廢料	50		不鏽鋼	FeCa膨潤土(60% 鈉膨潤土、35% 石英砂、5%石膏)	夯實膨潤土或花 Boom粘土	處置隧道襯砌	250	沉積岩/飽和帶；低於水沸 點	三條橫坑道	高放射性廢棄物放置 於坑道中央；用過核 子燃料放置於四周
加拿大	用過核子燃料	10	UO ₂	鋼製外殼 碳鋼內罐	砂-膨潤土混合物 (50:50)	砂-膨潤土混合物 (50:50)	橫坑與鑿井封存	500-1000	結晶岩/飽和帶	一條主隧道連接多條處置 隧道	垂直放置於處置孔內 或橫式放置於處置隧 道
捷克	中低放射性廢料		混凝土	鋼	純膨潤土	純膨潤土	膨潤土封存	450-500	花崗岩/飽和帶		
	用過核子燃料		UO ₂	鋼	純膨潤土	純膨潤土	膨潤土封存	450-500	花崗岩/飽和帶		
	高放射性廢料		玻璃體	鋼	純膨潤土	純膨潤土	膨潤土封存	450-500	花崗岩/飽和帶		
芬蘭	用過核子燃料	40	UO ₂	鈾-瓶	膨潤土無混凝土 塊	碎石-膨潤土混合 物(50:50)	膨潤土與混凝土封 存	500	結晶岩/飽和帶	一條主隧道連接多條處置 隧道	垂直放置於處置孔內 直徑2m高8m
	中低放射性廢料	15		不鏽鋼、混凝土容器	純膨潤土	膨潤土或頁岩	膨潤土與混凝土封 存	400-1000	結晶岩或沉積岩/飽和帶		
	用過核子燃料	15	CU1、CU2型	鋼製包封材料 不鏽鋼內罐	砂-膨潤土混合物 (70:30)	膨潤土或頁岩	膨潤土封存	400-1000	結晶岩或沉積岩/飽和帶		
法國	高放射性廢料	15	UO ₂ 、MOX玻璃 化固體(C型)	碳鋼包封材料(厚 55mm長1.6m直徑 55cm)	純膨潤土與精織 坑道	膨潤土或頁岩	膨潤土封存	500	黏土質岩	一條主隧道連接多條處置 隧道，主隧道直徑0.7m全 長40m每間隔8m設計一處 置坑道，長30m	
德國	高放射性廢料	40	不考慮工程障壁	不考慮工程障壁	鹽混凝土	壓岩岩體	封存	870	鹽岩/飽和帶	一條主隧道連接多條處置 隧道	垂直放置於處置孔內
日本	高放射性廢料	50	玻璃化固體	碳鋼包封材料	砂-膨潤土混合物 (70:30)	膨潤土、砂、 碎岩石	隧道封存	花崗岩1000 泥岩500	花崗岩/飽和帶	一條主隧道連接多條處置 隧道	用過核子燃料垂直放 置 高放射性廢棄物橫式放 置
韓國	用過核子燃料		UO ₂	鋼製或不鏽鋼外殼 碳鋼內罐	純膨潤土或砂-膨 潤土混合物	純膨潤土					
西班牙	用過核子燃料	30	UO ₂	碳鋼包封材料	花崗岩、泥岩、純 膨潤土 巖岩碎岩	純膨潤土	混凝土與膨潤土封 存	花崗岩550 泥岩250 巖岩600	結晶岩或沉積岩/飽和帶	兩條主隧道連接多條處置 隧道	橫式放置處置隧道
瑞典	用過核子燃料	30-40	UO ₂	鋼-瓶 鋼-瓶、不鏽鋼外殼 直徑2m長100m	MX-80膨潤土	碎石-膨潤土混合 物	隧道回填材料	400-700 面 積 0.3km ² 400-700 面積 1- 2km ²	結晶岩/飽和帶	一條主隧道連接多條處置 隧道 一條主隧道連接多條處置 隧道	KBS-3V 垂直放置處 置孔，直徑2m高8m KBS-3H 橫式放置處 置隧道
瑞士	高放射性廢料	40	玻璃體	鋼	純膨潤土	膨潤土磚或砂-膨 潤土混合物		花崗岩1000 泥岩850	結晶岩或沉積岩/飽和帶	一條主隧道連接多條處置 隧道	橫式放置處置隧道
英國	中低放射性廢料		水泥灌漿	鋼骨箱或混凝箱	水泥回填材料		低滲透係數封存				
中國	高放射性廢料		玻璃化固體		高爾子膨潤土			800-1000	花崗岩/飽和帶		
	用過核子燃料		直接處置		高爾子膨潤土			800-1000	花崗岩/飽和帶		
美國WIPP	TRU	10		208L鋼管	氧化鈣回填材料		混凝土鑿坑封存	300	凝灰岩/不飽和帶		
美國YMP	商業用過核子燃料 防護用過核子燃料 高放射性廢料	10	不鏽鋼覆蓋、 UO ₂ MOX、PuU、 銻	50mm厚不鏽鋼內罐			15mm鈦合金防罩 鈦合金防罩	300	凝灰岩/不飽和帶	三條平行處置隧道	橫式放置處置隧道
							鈦合金防罩				
							鈦合金防罩				

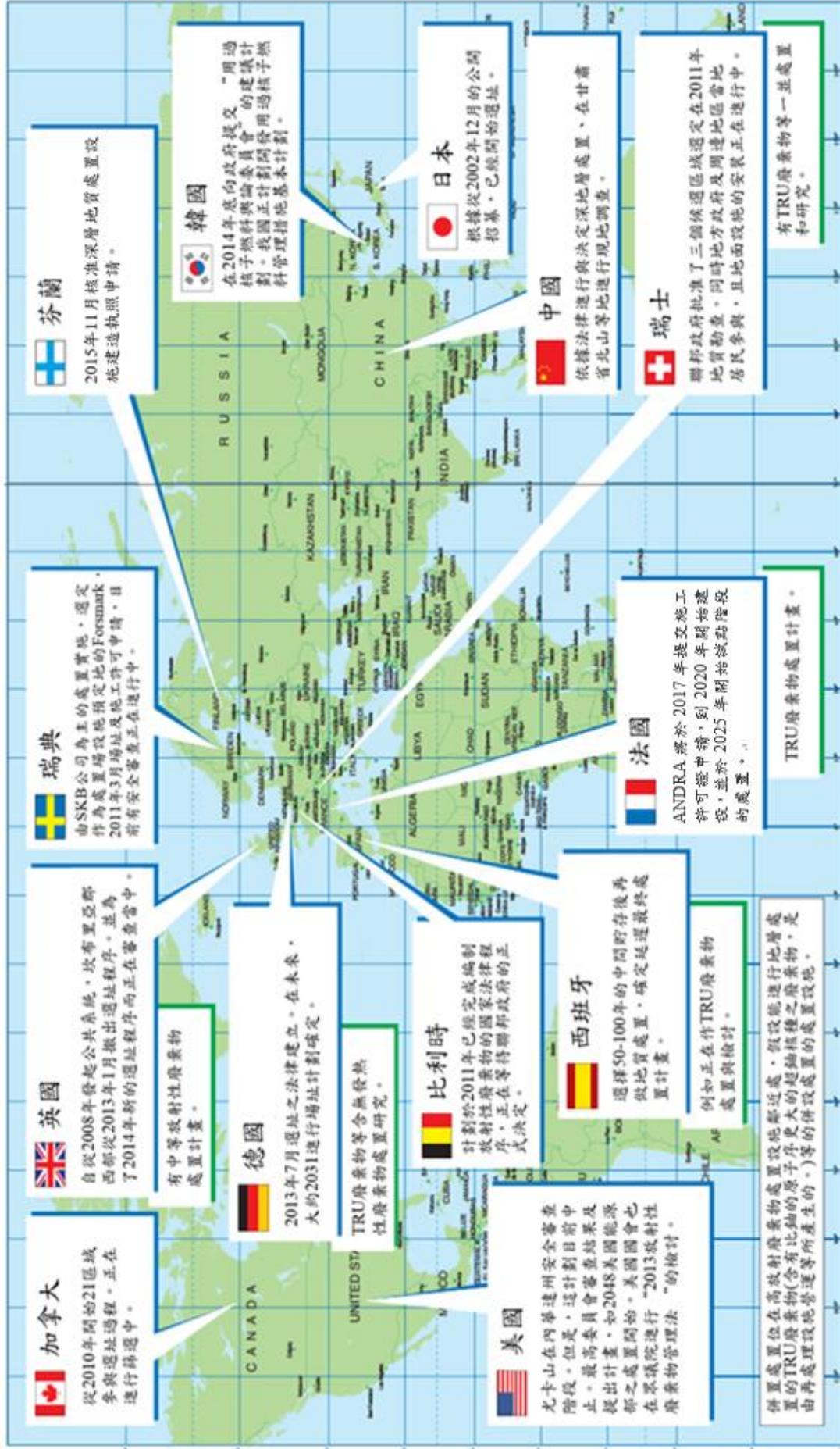


圖 2.2 各國處置場進展和比較

2.3 日本模擬試驗

2.3.1 模擬試驗概要

日本原子能研究開發機構（以下簡稱 JAEA）於平成 12 年 11 月與北海道幌延町簽訂「在幌延町深地層研究協定」，允許 JAEA 在幌延町進行關於高放射性廢棄物的深地層研究，並協議不使用、不帶具有放射性的廢棄物，其研究計劃分為三個階段，第一階段「從地面的研究階段」、第二階段「坑道開挖（地下設施建設）調查研究階段」、第三階段「地下設施研究階段」。並於平成 26 年開始著手進行第三階段的研究計劃，在幌延町地下 350 公尺深的調查坑道（試驗坑道 4）進行試驗，目的為人工屏障的性能測試，將人工屏障安裝於處置孔並進水以模擬現實可能遭遇到的情況，計畫內容如下：

1. 驗證深地層處置研究開發概念可在實際地下環境建造
2. 人工屏障及回填材料設計方法的適用性確認
3. 熱-水-應力-化學耦合連動關係的驗證

本報告則針對耦合試驗進行文獻回顧。

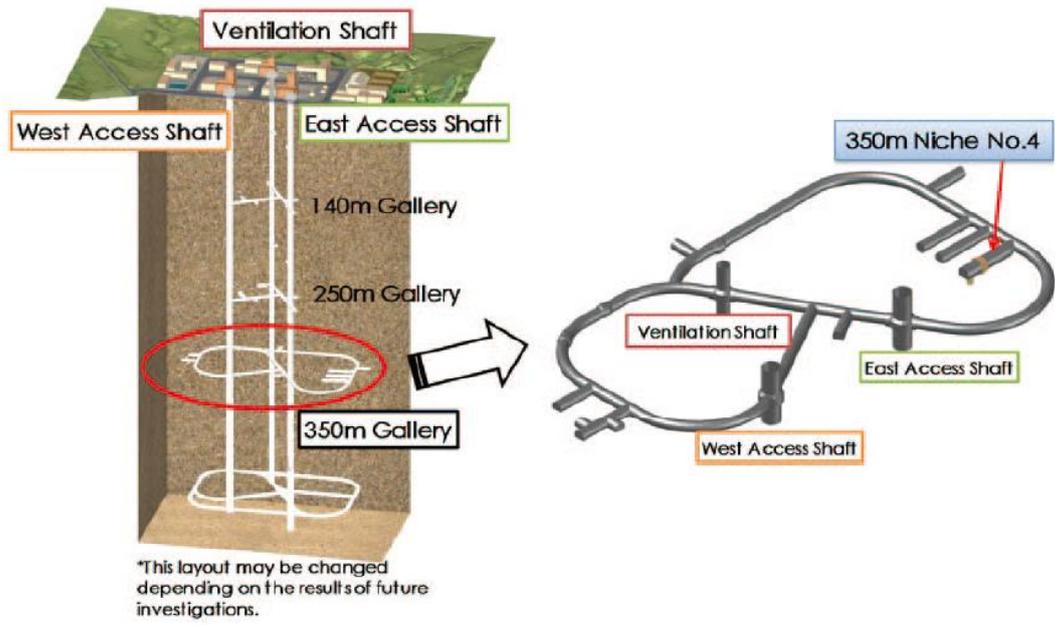


圖 2.3 日本處置場設施位置圖



圖 2.4 現地處置隧道圖

2.3.2 試驗材料、配置

(1) 緩衝材料

緩衝材料如表 2-2 所示，使用 Kunimine Industries Co.,Ltd 生產的膨潤土及 Nittoren Genryo K.K.生產的矽砂，並以 70：30 比例混和，原乾密度 1.8 Mg/m^3 ，加水經由回脹之後乾密度 1.6 Mg/m^3 ，含水量 10.5%，JAEA 認為這樣能使緩衝材料易於壓實製成，圖 2.5 為緩衝材料塊之製作過程。

表 2-2 日本耦合試驗材料表

試驗材料		
	規格	備註
材料	膨潤土(Kunigel V) 矽砂	Kunimine Industries Co.,Ltd. Nittoren Genryo K.K.
混合比例	膨潤土 70wt% 矽砂 30wt%	矽砂(No.3:No.5=1:1)
拌合水	自來水	
含水量	10.5%	
乾密度	1.8 Mg/m^3	回脹之後 1.6 Mg/m^3



圖 2.5 緩衝材料塊製作圖

處置孔為直徑 2.4 公尺，深 4.2 公尺的圓柱形，緩衝材料以垂直堆放的方式堆疊而成外徑 2.26 公尺，內徑 0.86 公尺的空心圓柱，共分為 12 層，每一層高度 0.35 公尺，如圖 2.6，每一層則由 8 塊或 9 塊膨潤土塊組合而成，如圖 2.7。緩衝材料的外圈和內圈均以細砂做為填充。

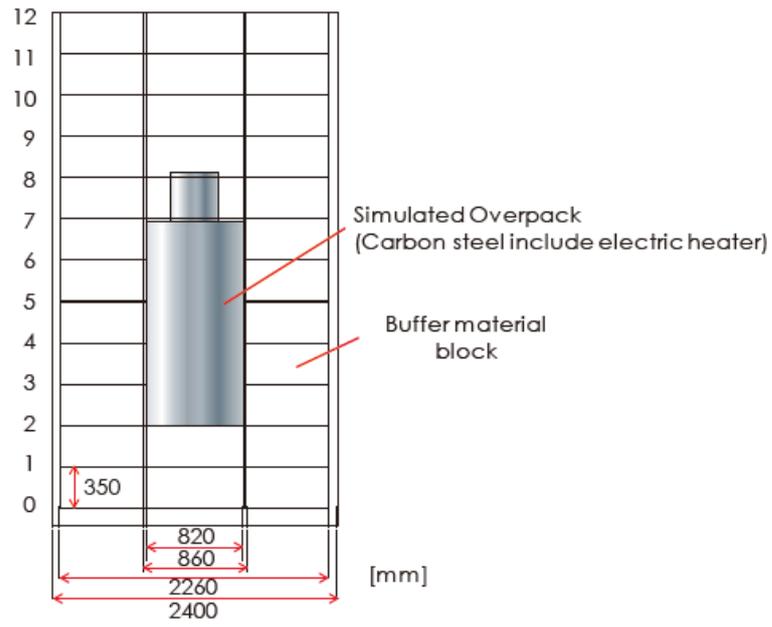


圖 2.6 日本模擬試驗配置圖(側面)

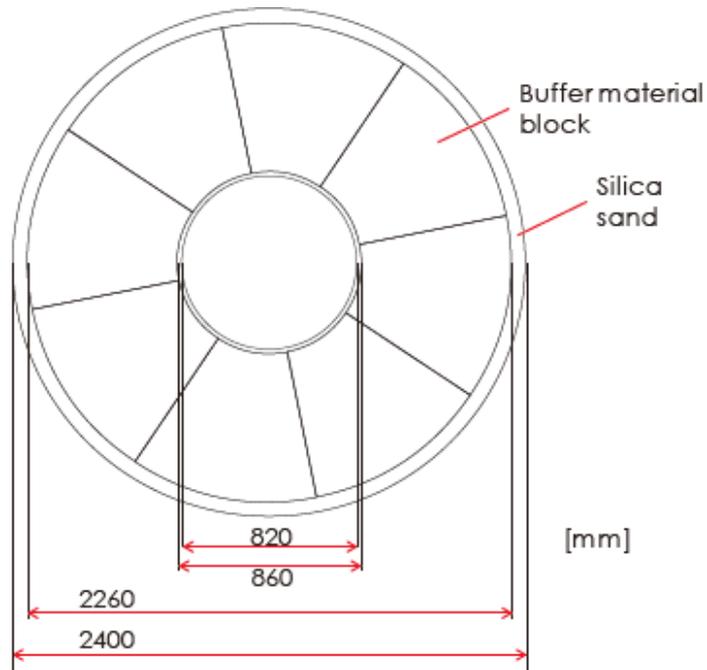


圖 2.7 日本模擬試驗配置圖(俯視)

(2) 熱源

為模擬未來處置罐因為衰變熱產生的熱，得設計出與實際情況符合且能夠穩定的控制表面溫度，以評估處置罐受腐蝕的情形。由於試驗位於地下 350 公尺深，也把可能所受到的壓力（緩衝材料回脹壓力與靜水壓力）考慮進去，以防止處置罐受到壓力推擠而產生變形破裂，因此 JAEA 選用 JIS G 3202 規範 SFVC1 型碳鋼，以作為包覆放射性核廢料處置罐的外包裝。

處置罐為圓柱形的形狀，上下端採固定狀態，中間空心部分，會在中間加入碳鋼來增加重量，如圖 2.8，以模擬實際處置罐的重量（5.7 噸），並在內部安裝加熱器，控制及模擬放熱情形，處置罐內部空隙則填充油來作為傳熱的介質。

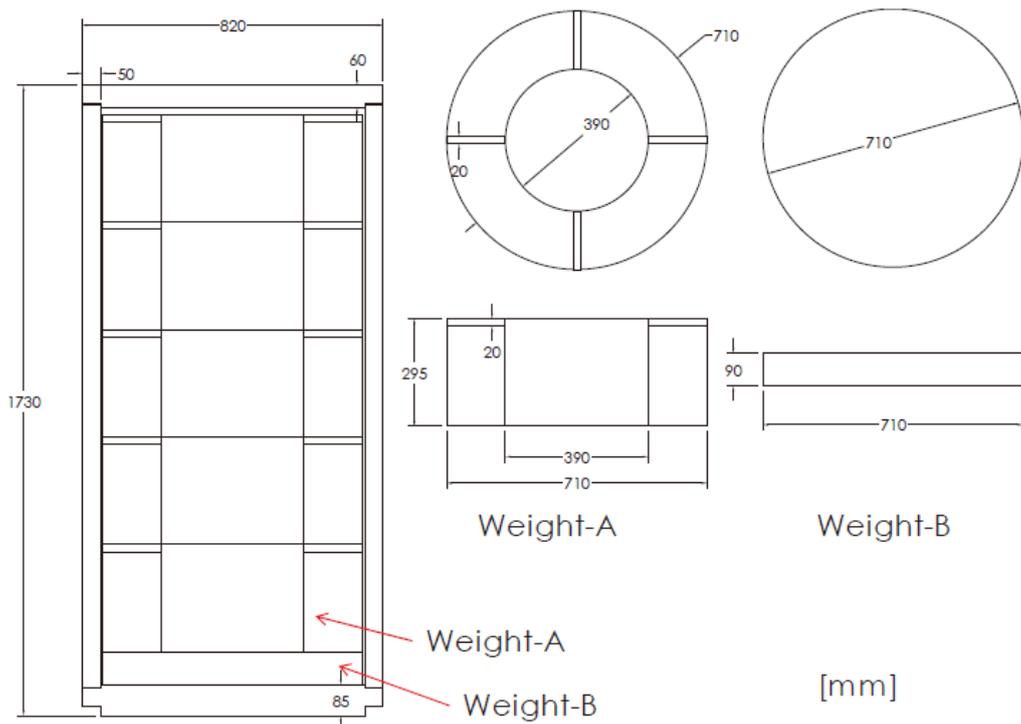
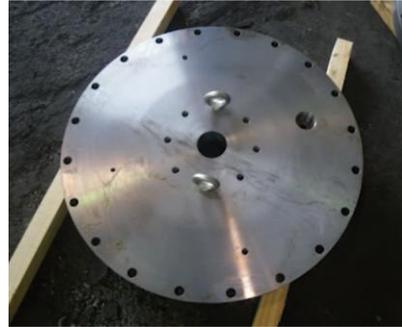


Fig. 12 Structure of simulated overpack

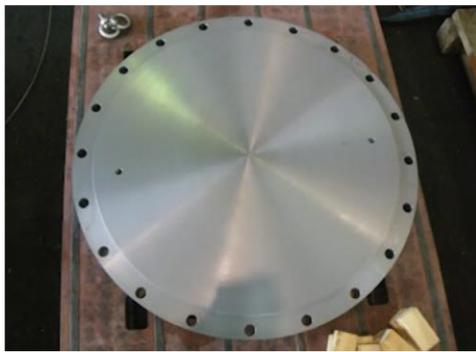
圖 2.8 處置罐構造圖



(a) 模擬熱源主體



(b) 上蓋



(c) 下蓋



(d) 重塊

圖 2.9 模擬熱源組件



圖 2.10 加熱器

(3) 感測器

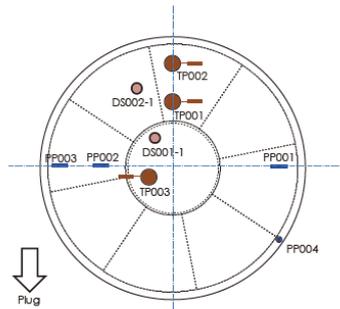
實驗以相關感測器進行配置，主要配置於 0~9 層，以觀察 THM 耦合情形，包括溫度、相對濕度、壓力等，詳細配置如表 2-3，並將各式感測器安裝在各層，而感測器主要安裝在 3~6 層，如圖 2.11，顯示出此位置為試驗的重點及於加熱器中埋設熱電偶感測器用來監測溫度，如圖 2.12。此外，也安裝位移感測器觀察緩衝材料因其回脹能力是否產生位移情形。

表 2-3 感測器配置圖

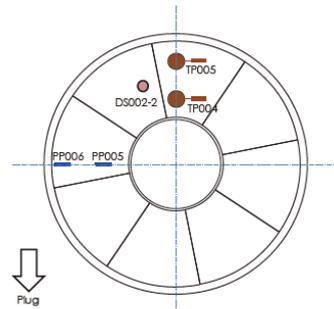
Sensors	ID	Measurement	unit	Section								total
				0	1	3	5	6	9	11	12	
Pressure cell	TP### TPWL###*1	swelling pressure, temperature	kPa, °C	3	2	2	4		2	1*1		14
Piezometer	PP### PPWL###*1	pressure head, temperature	kPa, °C	4	2	2	4	2	2	2*1		18
Borehole extensometer	DS###	displacement, temperature	mm	<>*2 <><>		><>	><>	><>		*2		6
Optical pH meter	PH###	pH	-			3	3	3				9
Thermocouple	TE###	temperature	°C			6	6					12
Pt electrode	EH###	V vs Ag/AgCl KCl sat.	V			3	3	3				9
Carbon steel corrosion sensor	CO###	corrosion potential, carbon steel potential	Ωcm ² , V			4	4	4				12
Hygrometer	RH###	relative humidity	%			3	3					6
Psychrometer	PS###	water potential	MPa			3	3	3				9
FDR-V	FD### (TEFD###)	volume water content (temperature)	% (°C)			3	3					6
Buffer material swelling sensor	CH## TEBS##	strain, temperature	- °C								14 2	16
total				7	6	30	34	16	5	3*1	16	117

*1: Using wireless sensor: collaborative research with Radioactive Waste Management Funding and Research Center (RWMC).

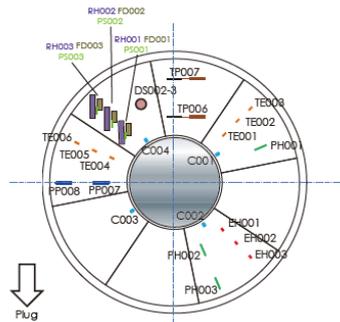
*2: Measurement section of temperature by borehole extensometer.



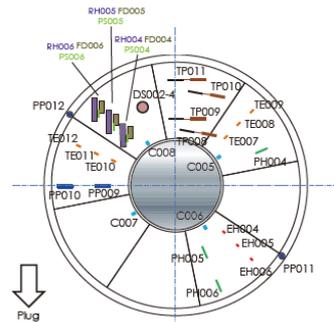
Location of sensors in buffer material: Section-0



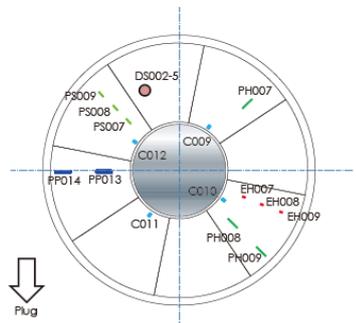
Location of sensors in buffer material: Section-1



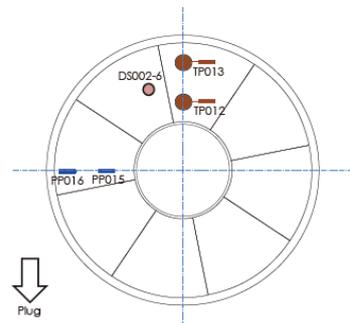
Location of sensors in buffer material: Section-3



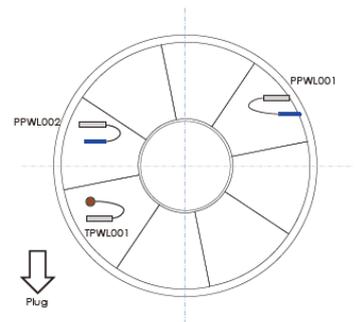
Location of sensors in buffer material: Section-5



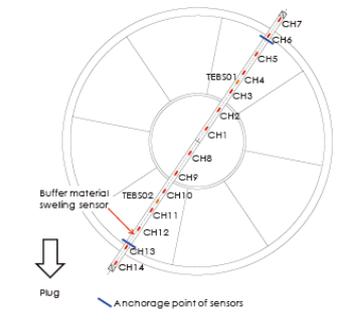
Location of sensors in buffer material: Section-6



Location of sensors in buffer material: Section-9



Location of sensors in buffer material: Section-11



Location of sensors in buffer material: Section-12

Buffer material swelling sensor consists of 14 strain sensors and 2 thermocouples.

圖 2.11 感測位置配置圖

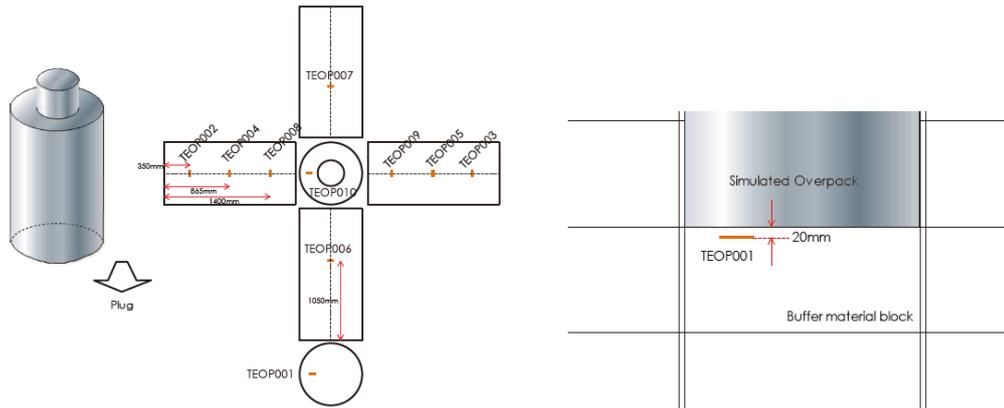


圖 2.12 熱源熱電偶感測器位置圖

(4) 進水系統

圖 2.13 為日本在開始安裝緩衝材料、加熱器等之前，先配置進水系統，採用由底部進水，底部的配置如圖 2.14，並在下方鋪設砂砂，有助水能更平均的進入緩衝材料中，並將水的速率設定在 80 ml/min。



圖 2.13 進水系統施工圖

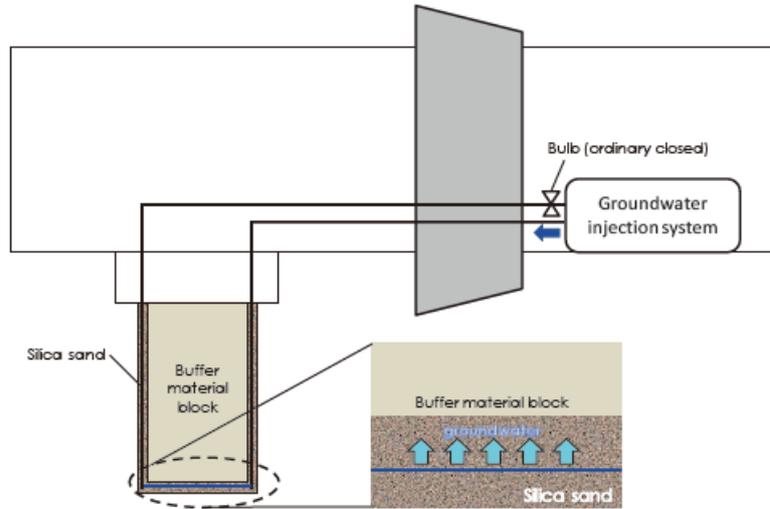


圖 2.14 進水系統配置圖

2.3.3 日本模擬試驗結果

圖 2.15 為各位置位移傳感器之量測結果，因緩衝材料回脹行為的影響，使底部受到推擠向上位移，然而 DS001-1 位於熱源下方，受到熱源自重影響，位移較為穩定平穩。其餘讀值部分由於原報告無額外說明，後續將由本研究嘗試分析歸納可能判釋結果。

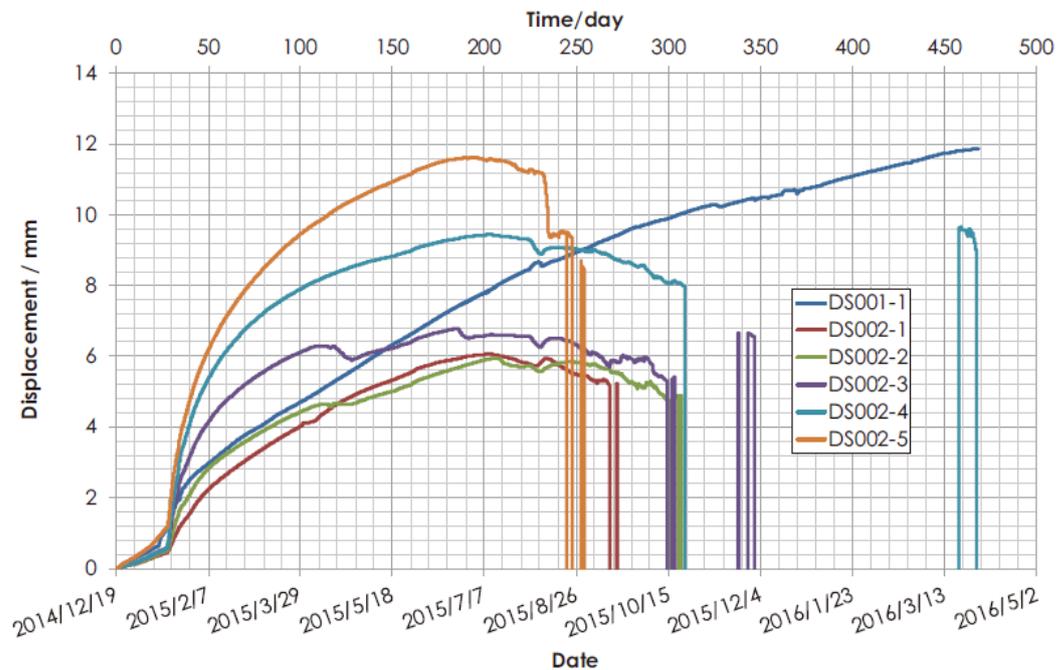


圖 2.15 日本模擬實驗位移傳感器結果

緩衝材料在受到進水影響，溫度約 1 年後達到穩定的狀態，表示水已經由底部向上入滲到圖 2.16 紅線的位置，此時的耦合行為也趨近穩定的狀態。圖 2.17 透過地電阻（Electrical Resistivity Tomography, ERT）的方式監測紅線位置之含水量歷時變化，熱源中間因溫度高，使之周圍乾密度降低，水分向外傳遞聚集在緩衝材料外側周圍，導致含水量提高。

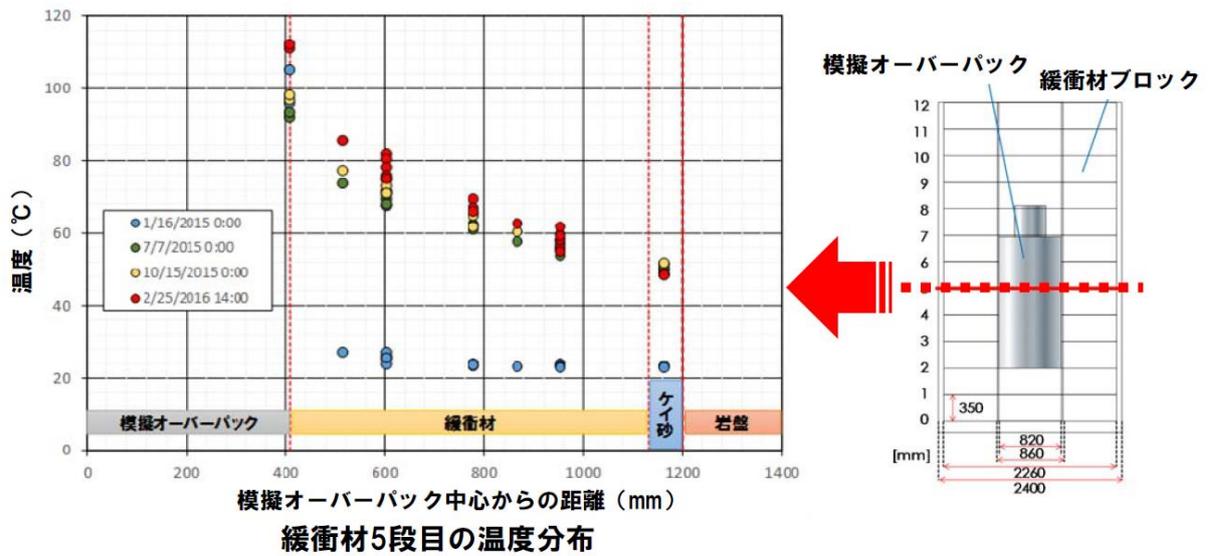


圖 2.16 日本模擬試驗第 5 層溫度分佈

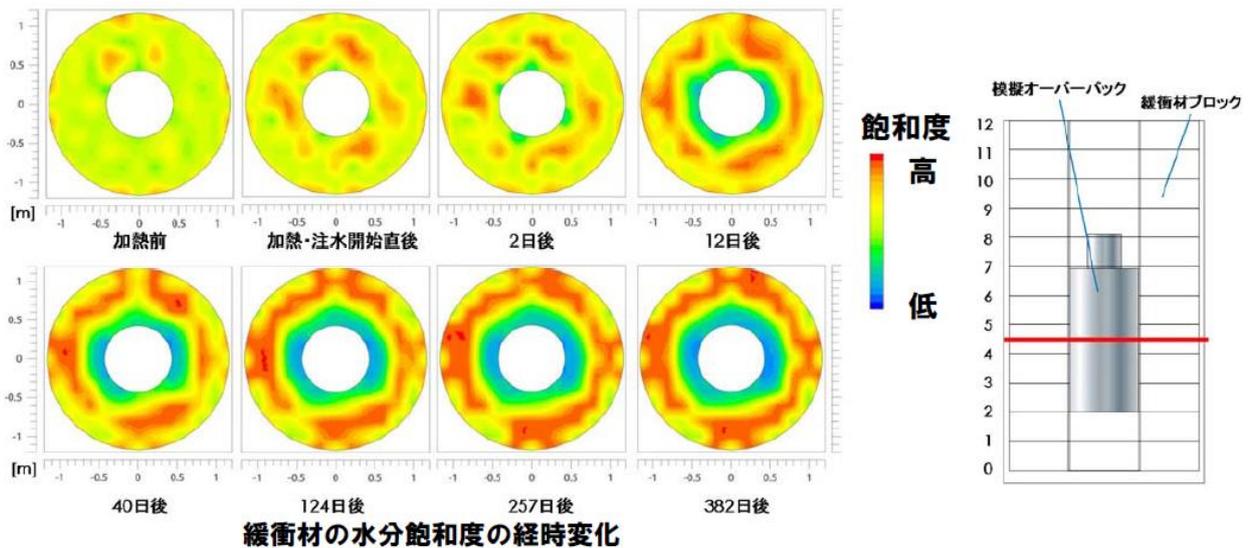


圖 2.17 日本模擬試驗第 5 層飽和度歷時變化

2.4 瑞典模擬試驗

2.4.1 瑞典試驗概要

SKB 設計指出，在開始進行回填作業之前，處置隧道內的緩衝材料及容器必須保存至多 3 個月的時間。而在此期間內，緩衝材料-膨潤土塊會以塑膠或橡膠製成的保護層進行保存，以確保不會受到水及高相對濕度的影響，並在回填作業開始前移除保護層。

在這段期間由於處置罐的溫度會影響緩衝材料，使緩衝材料內的水分進行再分佈，為了針對研究此水分再分佈過程，進行實驗室小型試驗，但基於大小尺寸間的縮放因子及小型試驗無法同時達到正確溫度和溫度梯度，SKB 則以全尺寸的試驗再次進行，研究重點旨在接近熱源中心緩衝材料溫度梯度的變化及水份再分佈情形，如圖 2.18，並在 4 個月後停止試驗，卸除試驗並整理數據。

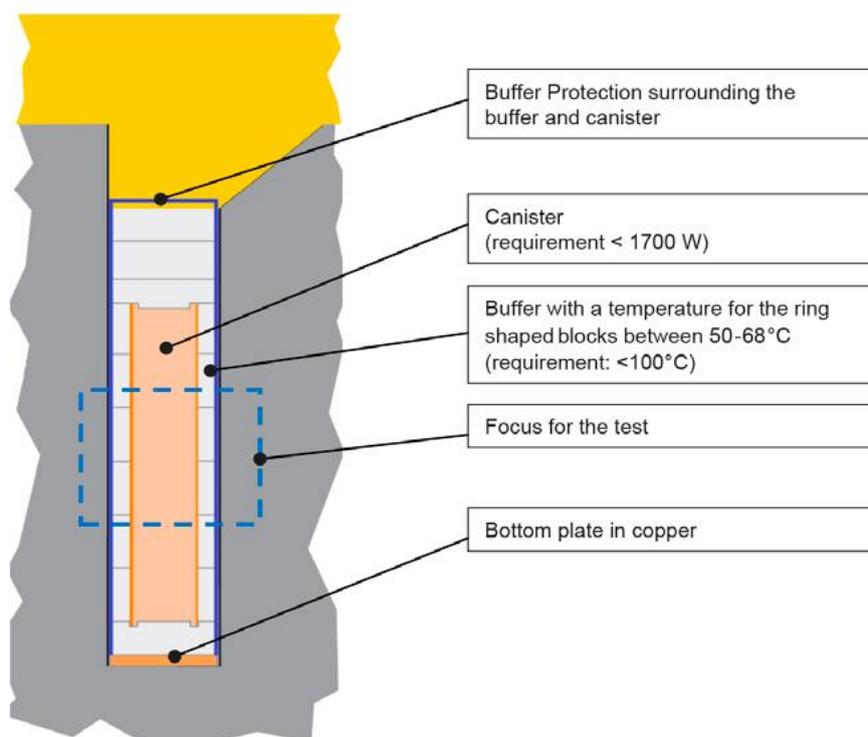


圖 2.18 大型試驗配置

2.4.2 試驗材料、配置

SKB 實驗使用其高 2.25 公尺，直徑 2.05 公尺，內徑 1.75 公尺的圓柱容器，如圖 2.19，並將 MX-80 膨潤土，平均含水量 17%，乾密度 1.81 kg/cm^3 ，製成兩塊的緩衝材料塊，圖 2.20 為實驗容器內的配置，各項說明如下：

1. 鋼蓋覆蓋於保麗龍之上，以提供隔離間距 $> 250\text{mm}$ 。
2. 外層為隔離玻璃棉 100mm（也覆蓋在容器頂部）。
3. 該罐有 150mm 厚的溫控水套，以能夠在緩衝材料外部設置溫度外，保護緩衝材料和岩壁的溫度。另外為確保整個實驗之溫度均勻，在整個實驗過程中使用幫浦循環水。
4. 緩衝塊和水套之間的空間。
5. 上膨潤土緩衝環。
6. 下膨潤土緩衝環。
7. 上下各 5 層的保麗龍（Sundolitt XPS300），各層厚度 $T = 100\text{mm}$ 。
8. 用於提升穩定性的上部鋼組件。
9. 水位。
10. 四個螺桿焊接到加熱器的提升叉（調整加熱器放置）。
11. 緩衝土塊及加熱器與保麗龍之間 50mm 的隔離玻璃棉。
12. 微調加熱器位置之裝置。
13. 五個加熱單元，距離外邊緣 250mm，距離砂底 200mm。
14. 加熱器和緩衝土塊之間的空間。
15. 均勻分布的沙。
16. 50mm 玻璃棉隔離，以保護保麗龍免受加熱器的熱影響。

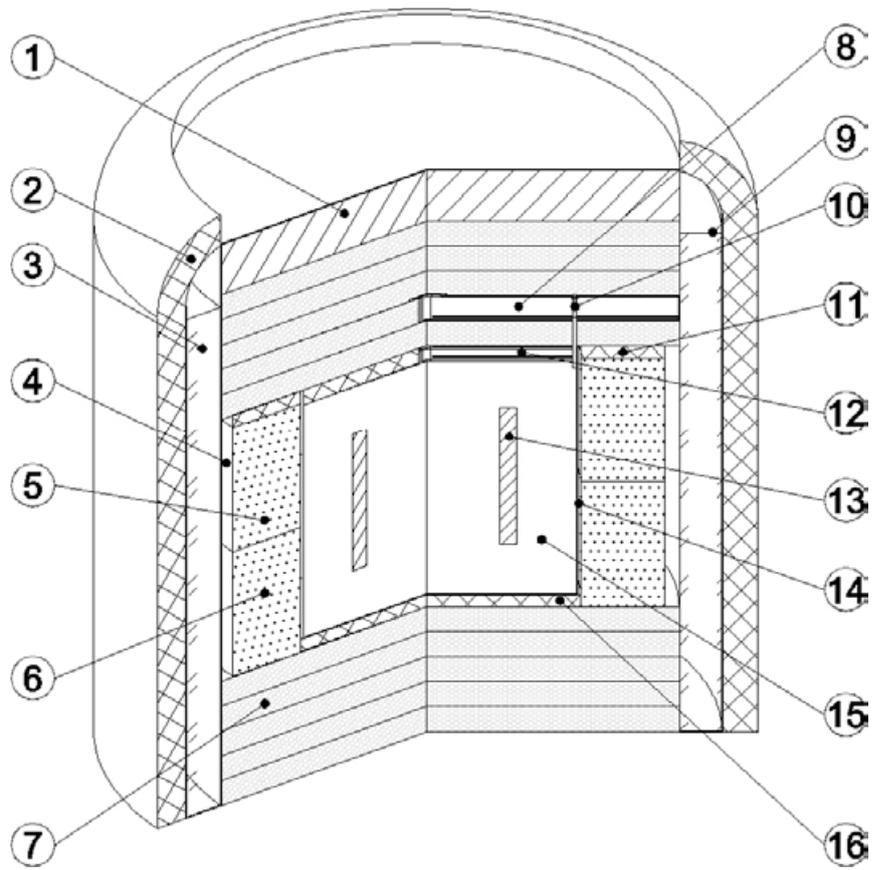


圖 2.19 瑞典實驗配置

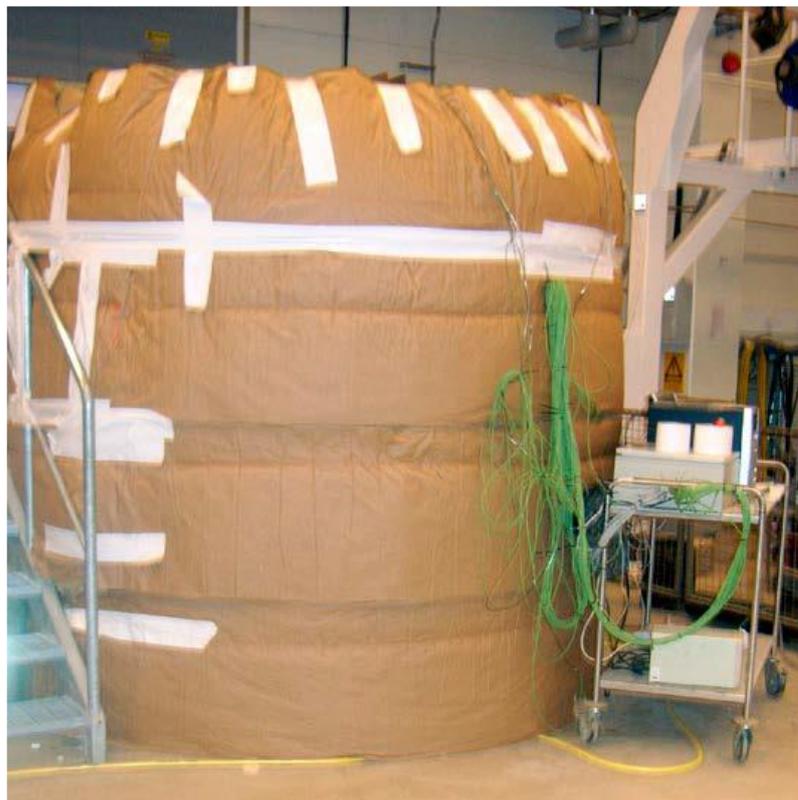


圖 2.20 實驗外觀

(1) 感測器

為監測實驗期間緩衝材料的變化，SKB 分別在上下緩衝材料環的四個方位，沿徑向安裝多組溫度及濕度感測器，試驗所使用之 RH(相對溼度)傳感器是 KIMO TH200 型，內置溫度傳感器 (Pt100 熱電偶)。根據電容的測量原理總共埋設了 8 個 RH 傳感器，配置如圖 2.21 所示。

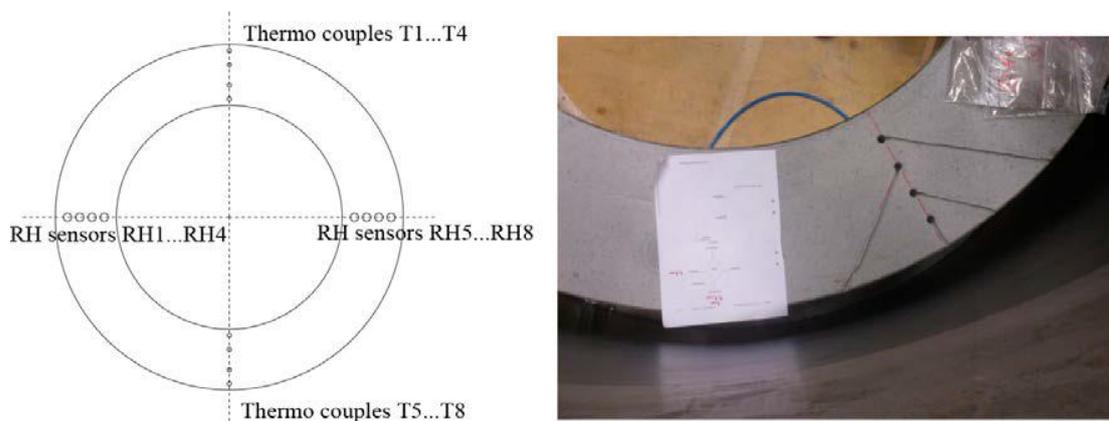


圖 2.21 傳感器配置

(2) 加熱器

加熱器上方有十字提升叉來調整位置，如圖 2.22，溫度部分參照 KBS-3V 模型並使用岩石熱導率 $2\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})$ 的溫度演變進行實驗。



圖 2.22 加熱器在實驗容器中

2.4.3 模擬試驗結果

1. 透過實驗，由於緩衝材料內部的溫度變化導致含水量再分布，造成加熱器附近大部分的乾密度增加，而也發現到容器底部的緩衝材料因吸收到冷凝水，導致含水量增加的情形，在實驗容器內的表面也發現到水的冷凝，即使緩衝材料的產生連續乾燥情況。這情況很可能也將發生在真實的處置孔中。
2. 緩衝材料環內部乾密度增加的變化，可能是緩衝材料環發生裂紋的主因（如圖 2.23 所示）。



圖 2.23 緩衝材料內的裂紋

3. 透過取樣分析後，發現兩緩衝材料環之間的含水量及乾密度均呈現分別如圖 2.24 與圖 2.25 在（方位角 10 度之剖面位置），以及圖 2.26 與圖 2.27（方位角 190 度之剖面位置）所示，代表水分在兩環塊之間縫隙蒸散較快，導致靠近加熱器的縫隙有較低的含水量，相對乾密度也相對提高。

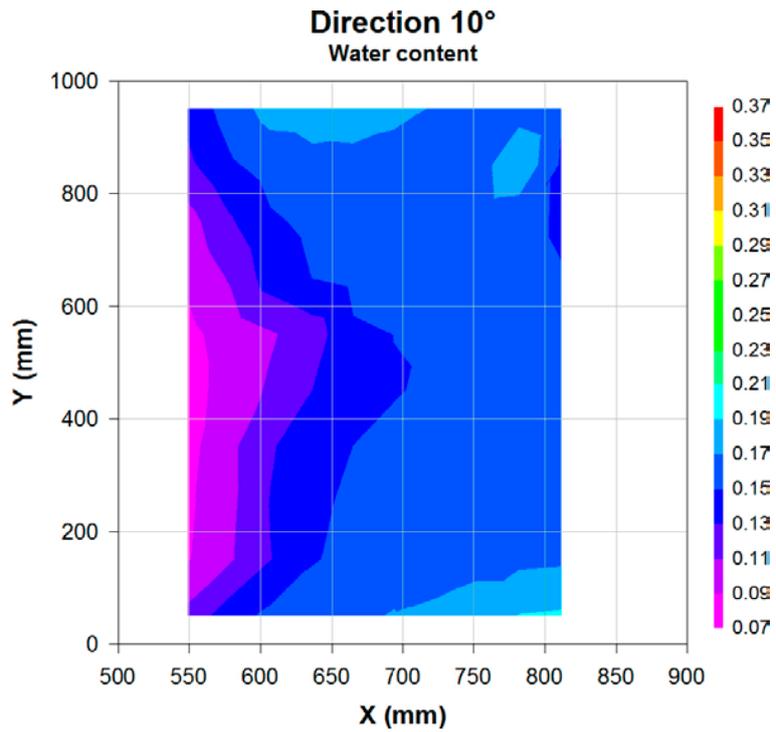


圖 2.24 在角度 10 度的含水量分佈圖

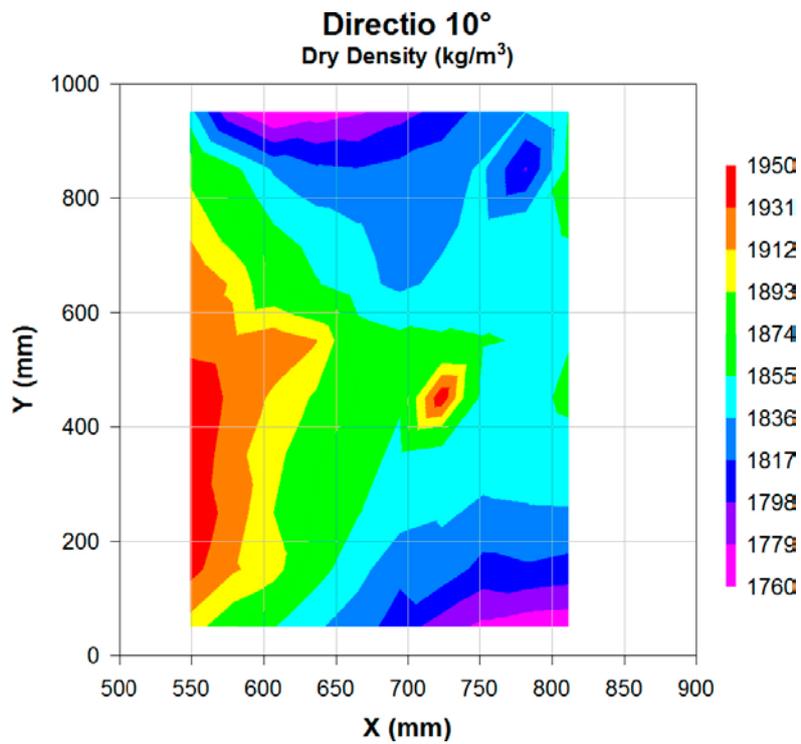


圖 2.25 在角度 10 度之乾密度分佈圖

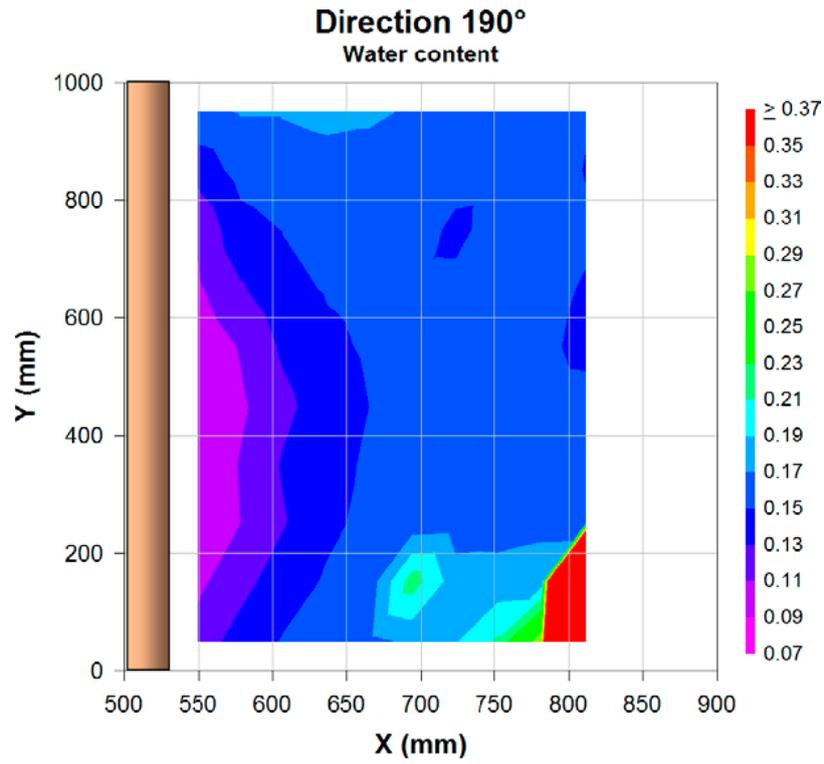


圖 2.26 在角度 190 度之含水量分佈圖

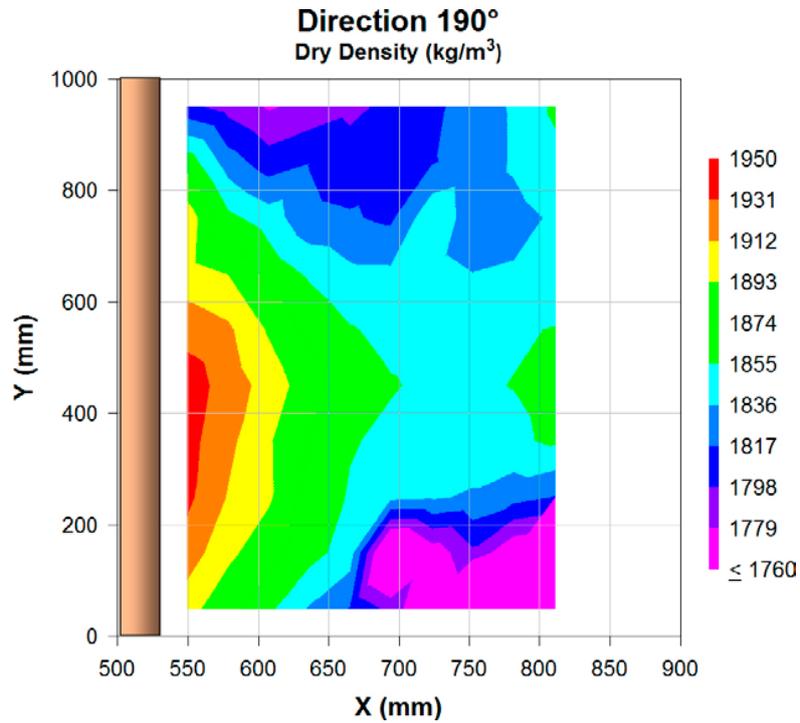


圖 2.27 在角度 190 度之乾密度分佈圖

利用 Code_Bright 程式模擬二維軸對稱模型，建立三種模式，如圖 2.28 分別為無洩漏、徑向洩漏與縱向洩漏，模擬緩衝材料之縫隙影響含水量變化的情形，圖 2.29 顯示左上角之含水量均沒受到影響而產生變化，相對比較來看，不管徑向還是軸向的洩漏，模擬的結果表示確定會使緩衝材料的乾燥情形增加，但是增加的情形有限。

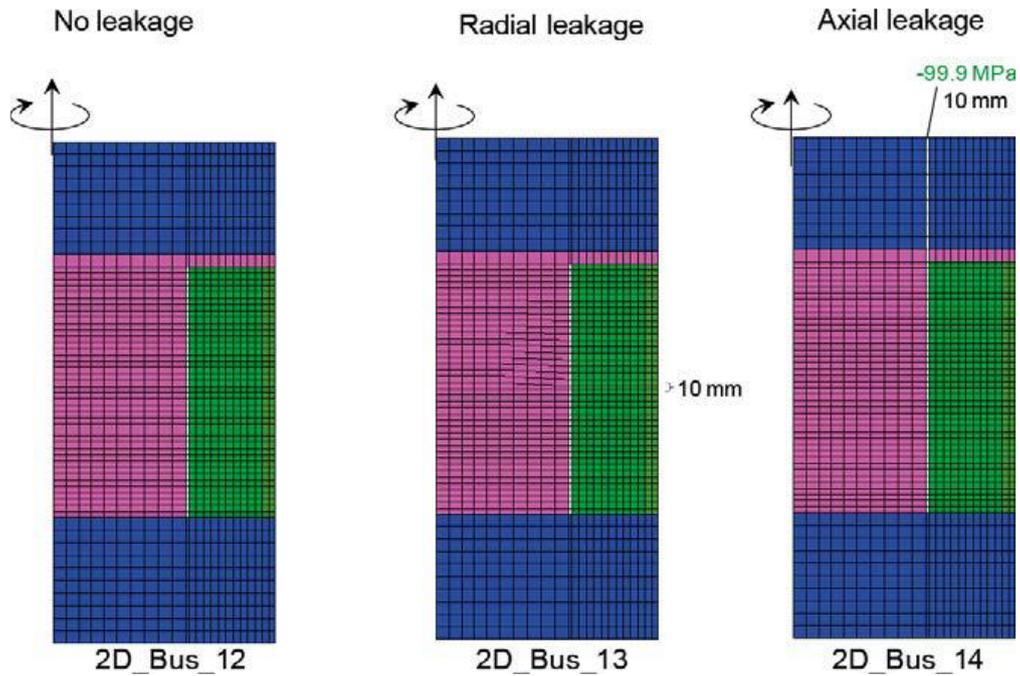


圖 2.28 三種幾何試驗模型

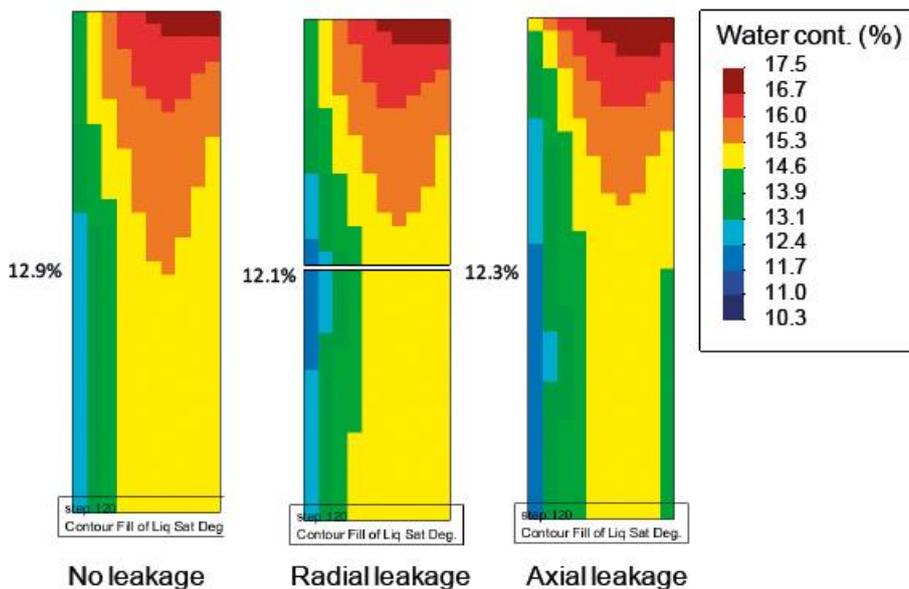


圖 2.29 在 120 天後三種模型的含水量輪廓圖

另外，透過 Comsol 程式模擬有洩漏路徑下之結果如圖 2.和圖 2.30，圖 2.實線為模擬的結果，點為測量的結果，橫軸為距中心之距離，圖示為量測試體之不同高度，發現在靠近緩衝材料上層內圍的部分（950 mm），含水量比模擬的結果高，顯示出在這個地方有水滲漏且集中在內圍；而溫度部分如圖 2.30，虛線為模擬溫度，實線為測量溫度，模擬的過程將熱損耗功率設定為 3 W/m^2 ，模擬結果與實驗有良好的對應，但緩衝材料外圍溫度比模擬數據還低，說明在外側會有熱的向外傳輸洩漏，使溫度降低。

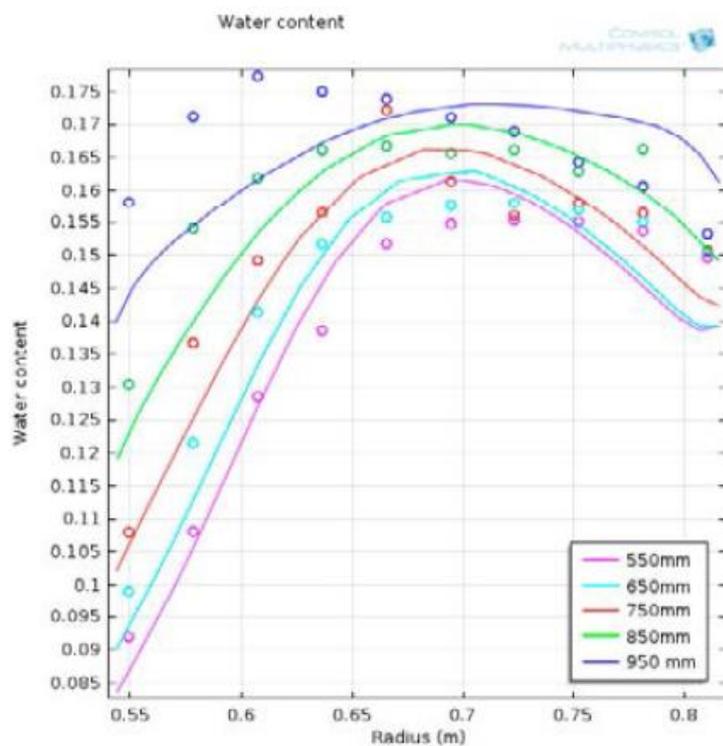


圖 2.30 含水量模擬和實驗比對結果

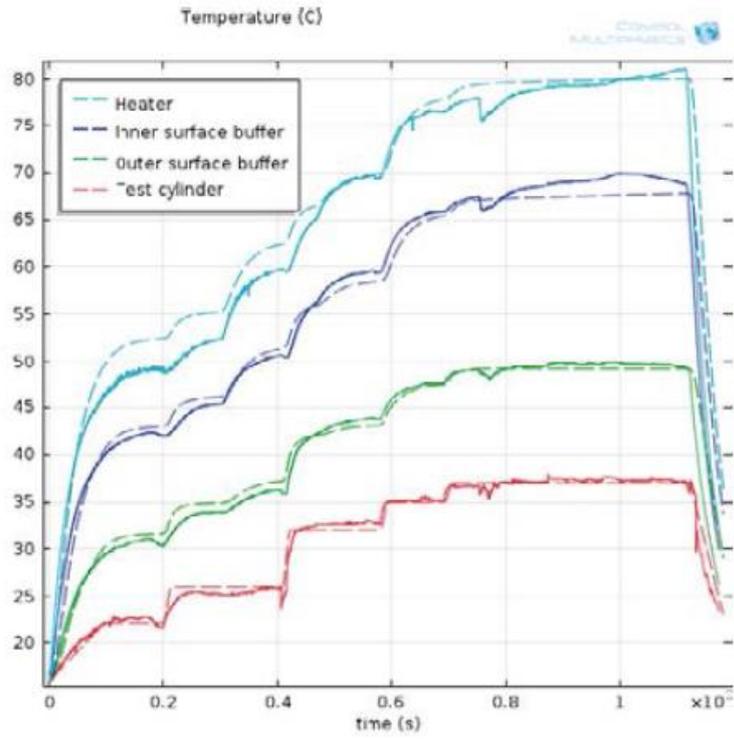


圖 2.30 溫度模擬和實驗比對結果

2.5 中國模擬試驗

2.5.1 模擬試驗概要

有關於中國核廢料的現地處置設計始於 1985 年，選於中國西北方的北山地區，其位置擁有堅硬的花崗岩地形，被認為適合放置具有高放射性物質的地方，並參考 KBS-3V 的設計概念，建立起中國高放處置場的初步概念，而此概念為一軸向的處置隧道，將具有高放射性的核廢料固定安裝於銅罐之中，並以膨潤土包覆作為緩衝材料，埋設於地下深度 500 公尺的花崗岩地質中且有飽和的地下水經過，如圖 2.31。中國根據其高放參考設計概念，建立出一實驗室模擬試驗，名為「China-mockup」，以進行現地模擬技術評估，以及 T-H-M 耦合過程，為了數值模擬和進一步的試驗調查，試驗期限設定不短於 4 年，用以充分獲得可靠的數據來源。

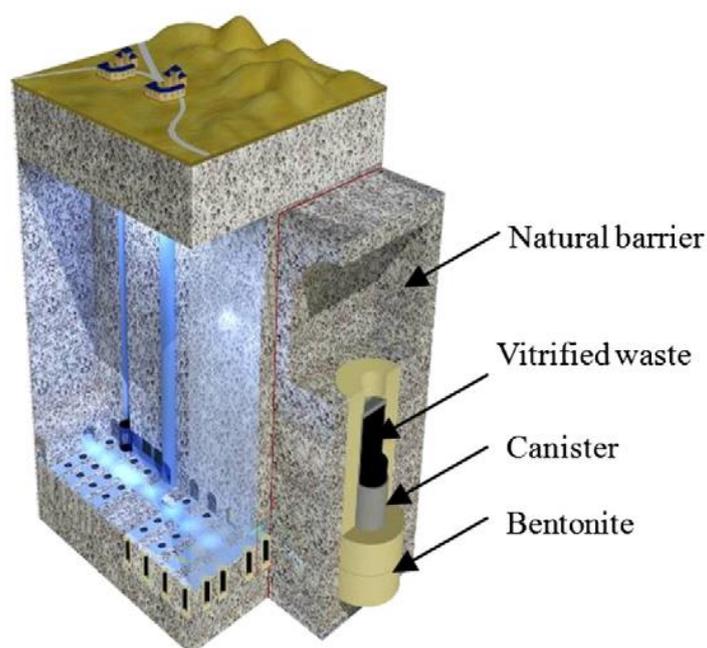


圖 2.31 中國模擬試驗概念圖



圖 2.32 中國模擬試驗之實驗室

2.5.2 模擬試驗材料、配置

(1) 緩衝材料

中國選用的緩衝材料為高廟子膨潤土，由中國北方的內蒙古自治區開採，距北京西北 300 公里，透過分析主要含量以蒙脫石為主（75±1%），另包含石英（12%）、方英石（7%）、長石（4%）、方解石和高嶺石（1%），初始乾密度為 1.7 kg/m^3 ，是目前中國認為最適合做為緩衝材料的材料。

(2) 實驗配置

圖 2.33 為實驗的配置圖，採用固定體積的方式進行，採下方進水模擬地下水入侵，內部由膨潤土塊組合堆疊而成，如圖 2.34，並在組合完成後於上面安裝傳感器，包括溫度、相對濕度，位移、壓力、應力等，如圖 2.35，分別安裝在 7 個不同高度層，對應 3 大重點，第一，I、II 層部分為 T-H-M 耦合過程；第二，III、IV、V 層為緩衝材料受溫度影響過程；第三，VI、VII 層則是緩衝材料原始狀態，綜合以上實驗數據來探討 T-H-M 耦合過程變化。

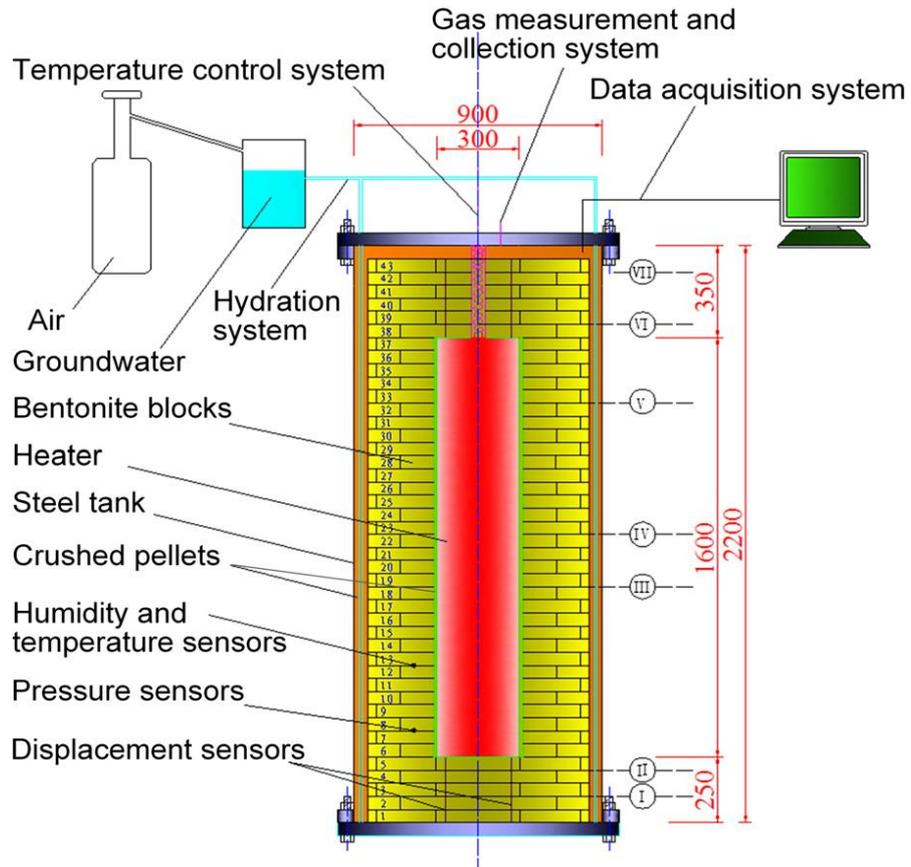


圖 2.33 中國模擬試驗配置圖

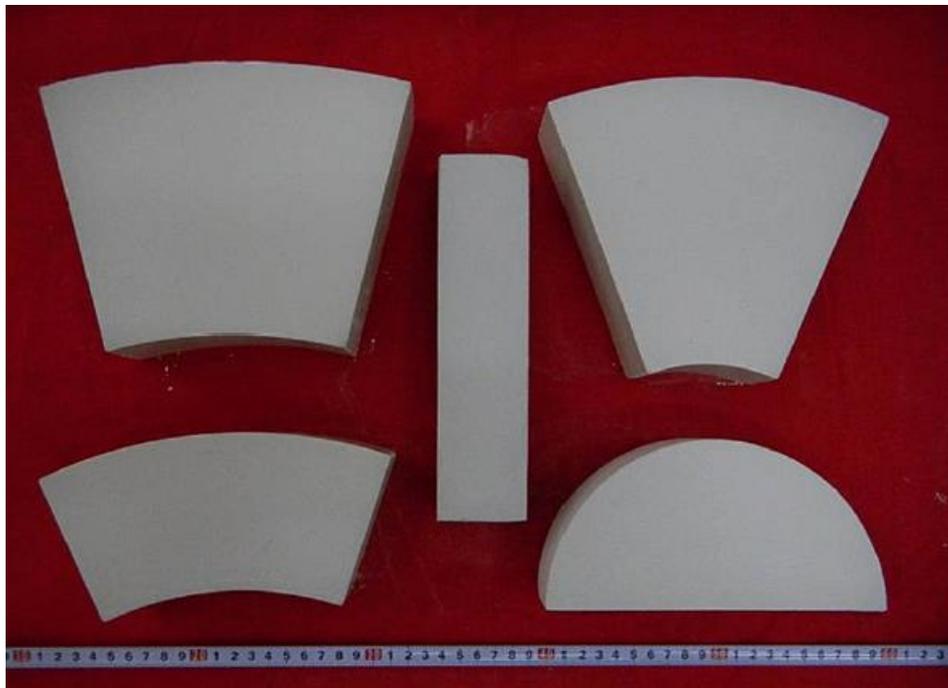


圖 2.34 中國模擬試驗緩衝材料組塊



圖 2.35 中國模擬試驗感測器配置圖

(3) 加熱器

實驗加熱分為四階段，開始前兩天將溫度升高到 30 度，在接下來的 95 天保持溫度，用來確認加熱器穩定性；98~255 天逐漸加熱至 90 度，隨後則保持 90 度，這是中國目前處置概念所預測的最高溫度。加熱器高 1.6 公尺，但實際有效的中心加熱長度只有 1.2 公尺，溫度監控系統則由電腦進行控制。

(4) 進水系統

採用以底部進水的方式進行，在一開始為了避免突然的飽和過程使得傳感器損壞，將速率控制在 400 g/day，逐漸增到 1200 g/day，當達到飽和狀態，則施加 2 MPa 恆定的壓力持續進水，直至實驗結束，如圖 2.36。

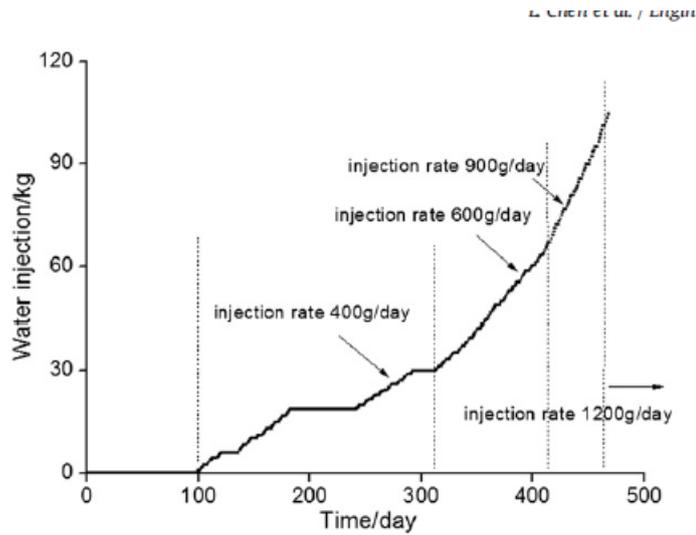


圖 2.36 中國模擬試驗進水歷程

2.5.3 模擬試驗結果

第 II、III 與 VI 層之緩衝材料受到加熱器增溫和注水的結果分別如 圖 2.37 至圖 2. 所示，說明在越靠近熱源的地方，溫度明顯高於其他地方，第 II 層因受到底部進水影響，相較第 III 與 VI 層來看相對穩定過程較慢，變化也相對較大。

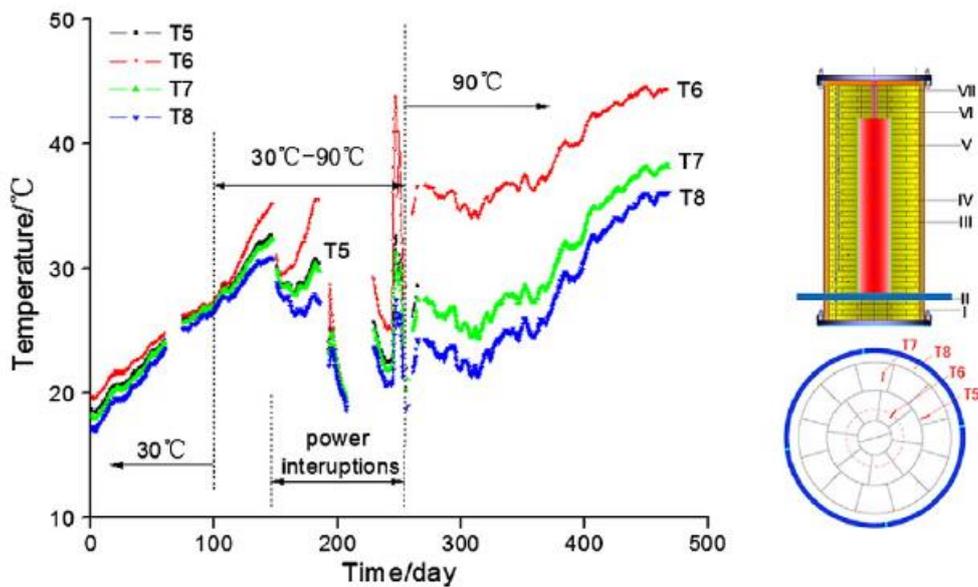


圖 2.37 第 II 層溫度變化 (T5 在 280 天後停止運作)

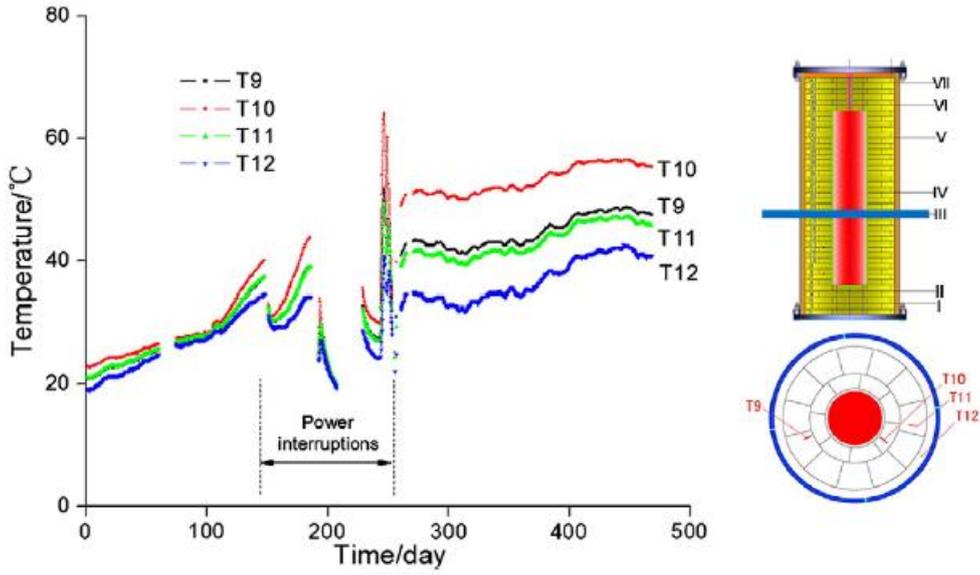


圖 2.38 第 III 層溫度變化

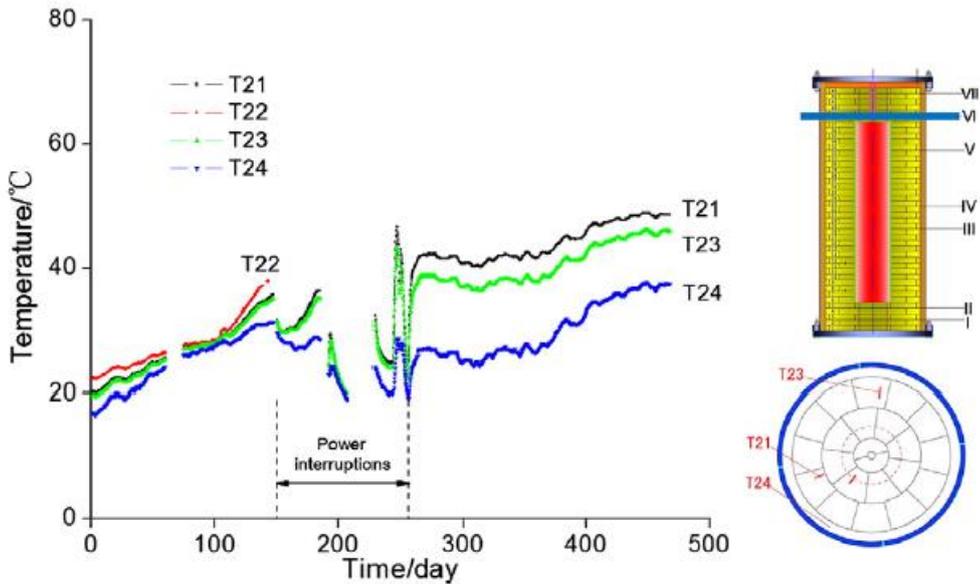


圖 2.40 第 VI 層溫度變化 (T22 在 150 天後停止運作)

在進水部分，第 I、III 與 VII 層由於受到加熱器影響的水分變化過程，如圖 2.39 至圖 2.41 所示，在底部第 I 層離加熱器較遠受到影響較小，且因進水關係 H3 不久即達到飽和狀態。而在第 III 層部分，如圖 2.40，H8、H9、H10 因離加熱器較近，雖然進水的流量增大，但乾燥的情形仍抵制了飽和作用，使之水分蒸發向外，導致飽和度降低；VII 層因離進水處較遠，受到進水的

影響較小，反而受到熱源的影響，使得 H22 所測得之相對濕度降低。

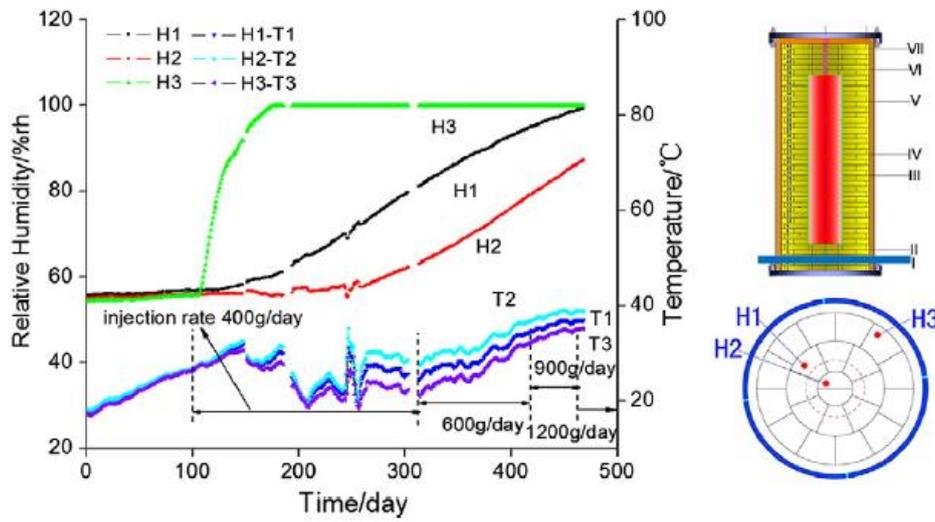


圖 2.39 第 I 層相對濕度變化

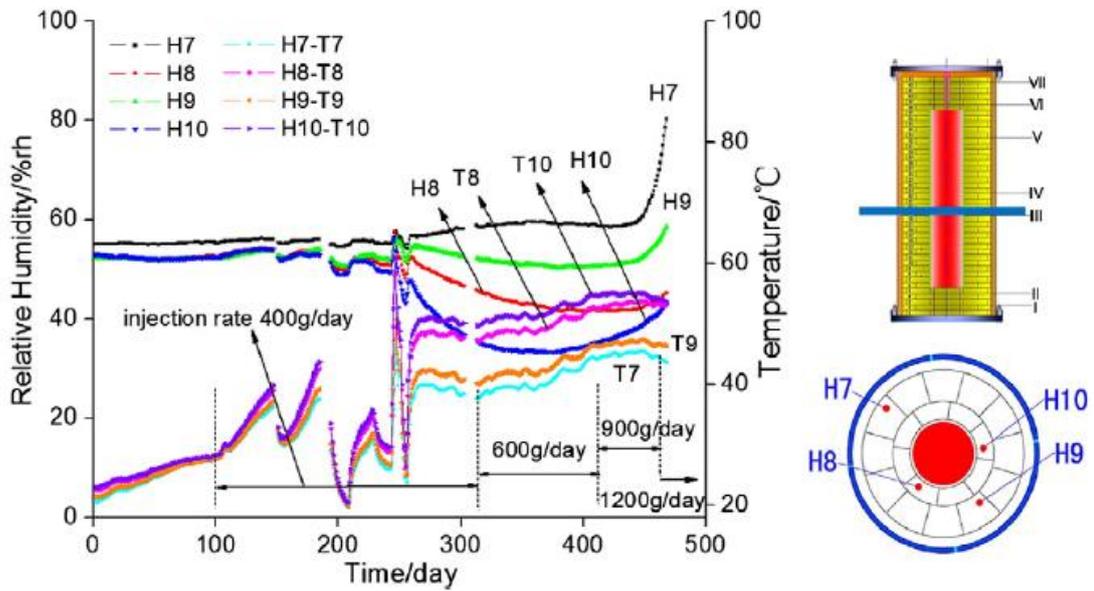


圖 2.40 第 III 層相對濕度變化

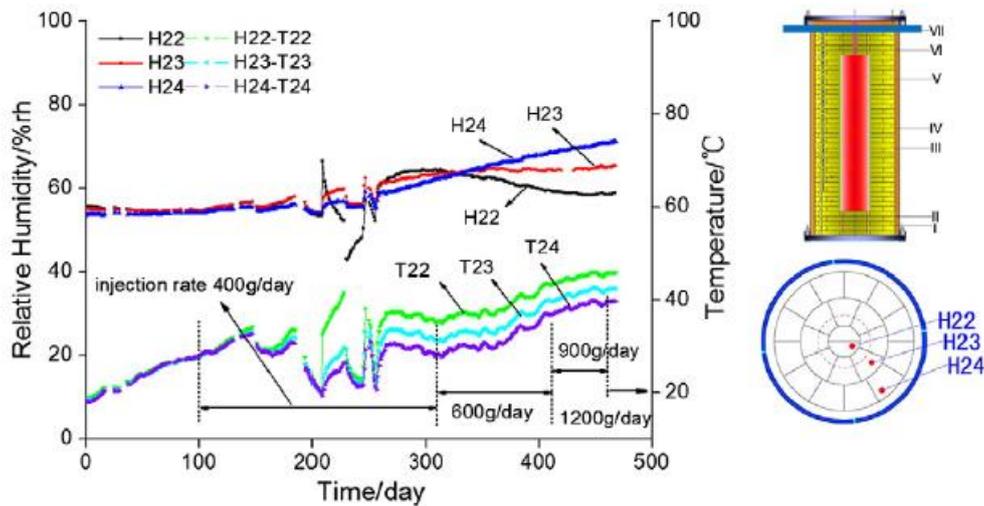


圖 2.41 第 VII 層相對濕度變化

底部受到 TH 耦合效應和膨潤土回脹特性的影響，不均勻的飽和過程，也產生不均勻的應力變化，如圖 2.42，試驗初期，由於土應力感測器在壓實膨潤土塊中的安裝縫隙不均勻，應力不斷調整。當應力感測器與壓實膨潤土塊完全接觸後，隨著水向內部膨潤土塊中滲透，壓實膨潤土中的應力逐漸增大。距離注水管較近的壓實膨潤土塊的應力主要由膨潤土遇水膨脹引起的，由於壓實膨潤土塊與腔體間充填了低密度的壓實膨潤土顆粒，存在應力釋放和密度調整，其應力低於腔體中部的應力。加熱器下部的應力感測器 12 由於加熱器的熱效應和膨潤土遇水膨脹的雙重作用，應力最高。隨著水由注水管向內部壓實膨潤土滲透，中部壓實膨潤土的應力（應力感測器 11）逐漸增大並超過低密度區的應力（應力感測器 14）。

受到加熱器自重及回脹壓力影響，加熱器也因此受到推擠產生位移如圖 2.43，主要為加熱器下方 LVDT 1~3 因進水而產生膨脹（負值為位移拉昇），加熱器上方 LVDT 6~8 為壓縮。說明緩衝材料受進水膨脹可能會影響處置罐的穩定性，這對於模擬試驗的設計和軟體模擬分析參數、邊界條件上的設定值得做深入探討及研究。

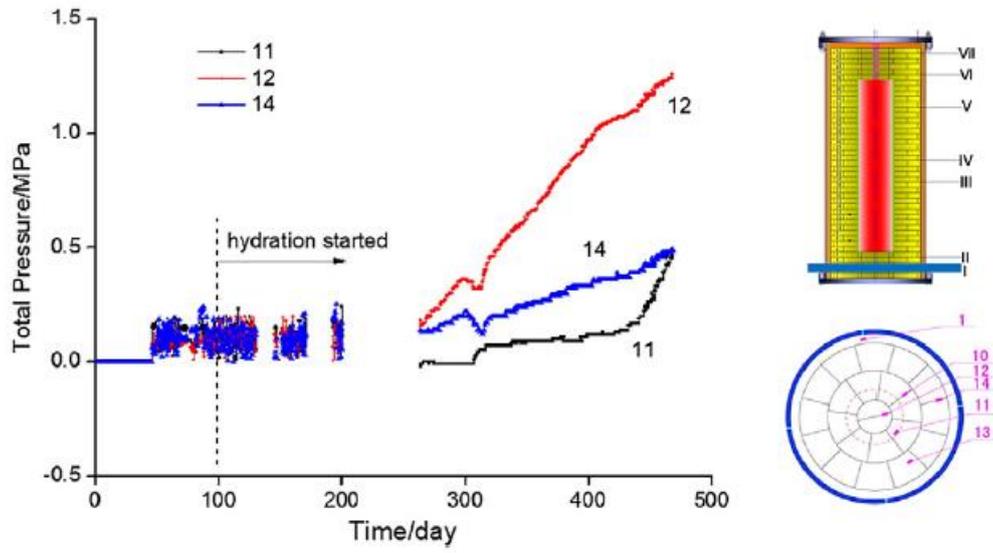


圖 2.42 I層壓力變化

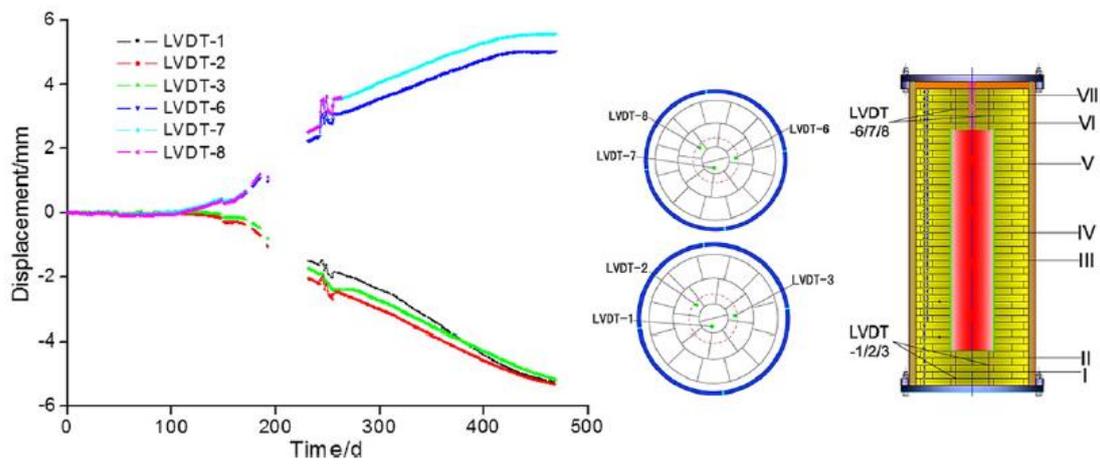


圖 2.43 加熱器垂直位移變化

中國模擬試驗透過感測器所得到之數據，後續則使用有限元素分析程式，做溫度與相對濕度之比較，如圖 2.44 及圖 2.45。在溫度部分，圖 2.44 模擬數值與實驗數據相當，但在圖 2.45 相對濕度之模擬數值比測量數值來的低，程式模擬因表示緩衝材料是均質的，但實際上緩衝材料組合之間有縫隙，水透過縫隙間或感測器之纜線進入緩衝材料，在未來使用程式模擬須將縫隙因素參考進去，這部分與上述 SKB 結果類似。

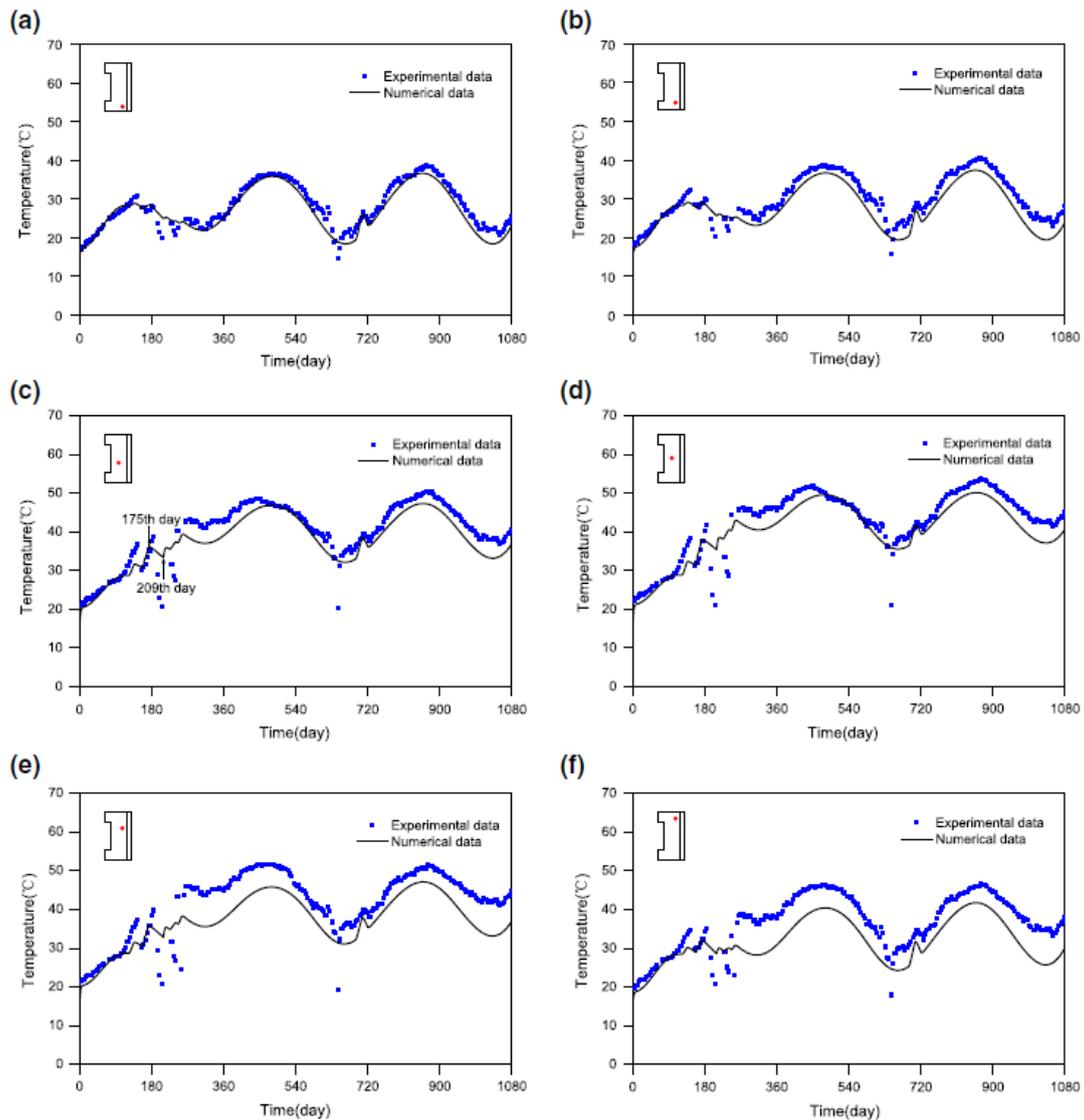


圖 2.44 不同位置之溫度預測和實驗比對結果

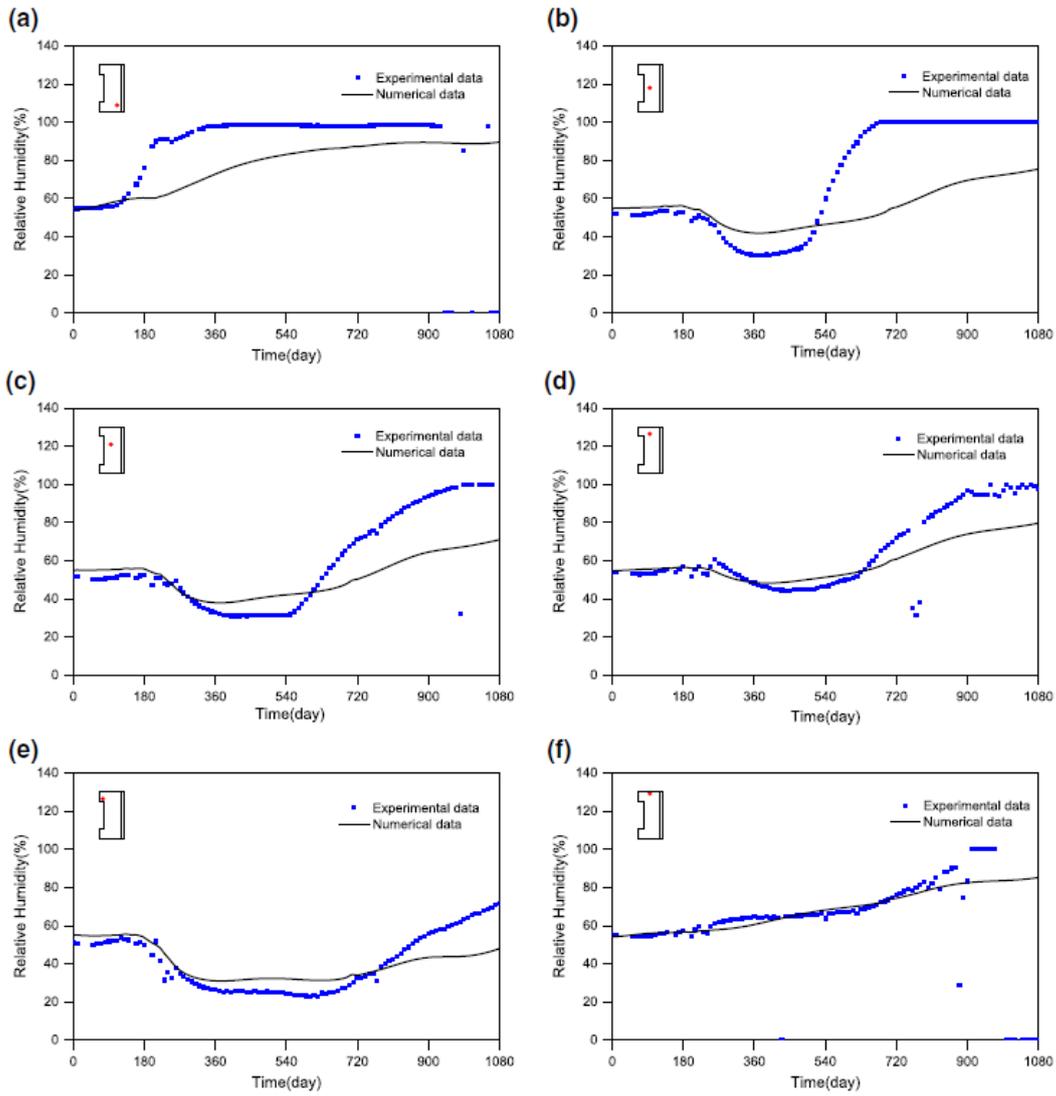


圖 2.45 不同位置之濕度預測和實驗比對結果

2.6 西班牙模擬試驗

2.6.1 模擬試驗概要

西班牙於 1984 年建立西班牙放射性廢物管理機構 (ENERSA)，旨要保護人及環境避免遭受到放射性廢物污染，而在目前其深地層處置概念為用過核子燃料罐以高密度膨潤土為屏障包覆將其以水平方式處置，其工程障壁設計流程包括最初不飽和膨潤土、衰變熱對緩衝材料的熱梯度變化及地下水入侵，在數值模擬預測上，大都顯示出在衰變熱消失之前，緩衝材料將會完全飽和，且在處置後 100-1000 年間發生。ENERSA 為了解其耦合過程及膨潤土長期受衰變熱影響，進行一系列的實驗，包含在大規模現地試驗、大型及小型實驗室試驗。

2.6.2 試驗配置、材料

(1) 緩衝材料

FEBEX 膨潤土由西班牙的阿爾梅里亞所開採，並經由工廠加工研磨，在 60 °C 下烘乾且粒徑通過 5 mm，主要含量以蒙脫石為主 (90% 以上)，且主要交換陽離子為是鈣 (35 ± 2 meq/100g)，鎂 (31 ± 3 meq/100g) 和鈉 (27 ± 1 meq/100g)，目前西班牙試驗皆採用 FEBEX 膨潤土。

(2) 現地試驗

於瑞士 NAGRA 所管理格里姆塞爾試驗場底下所進行的現地試驗，周圍為花崗岩層，建構出長度 70 公尺，直徑 2.3 公尺處置隧道，裡面主要為 2 個加熱器且間格 1 公尺，大小和重量與現實處置罐相關。緩衝材料厚度為 65cm，初始乾密度 1.69 kg/m^3 - 1.7 kg/m^3 ，如圖 2.46 西班牙現地試驗配置圖，加熱器溫度恆定 100°C ，試驗分為兩階段，第一階段進行 5 年後，將靠近處置口之加熱器卸除，第二階段剩下之加熱器在此報告表示仍持續進行試驗。

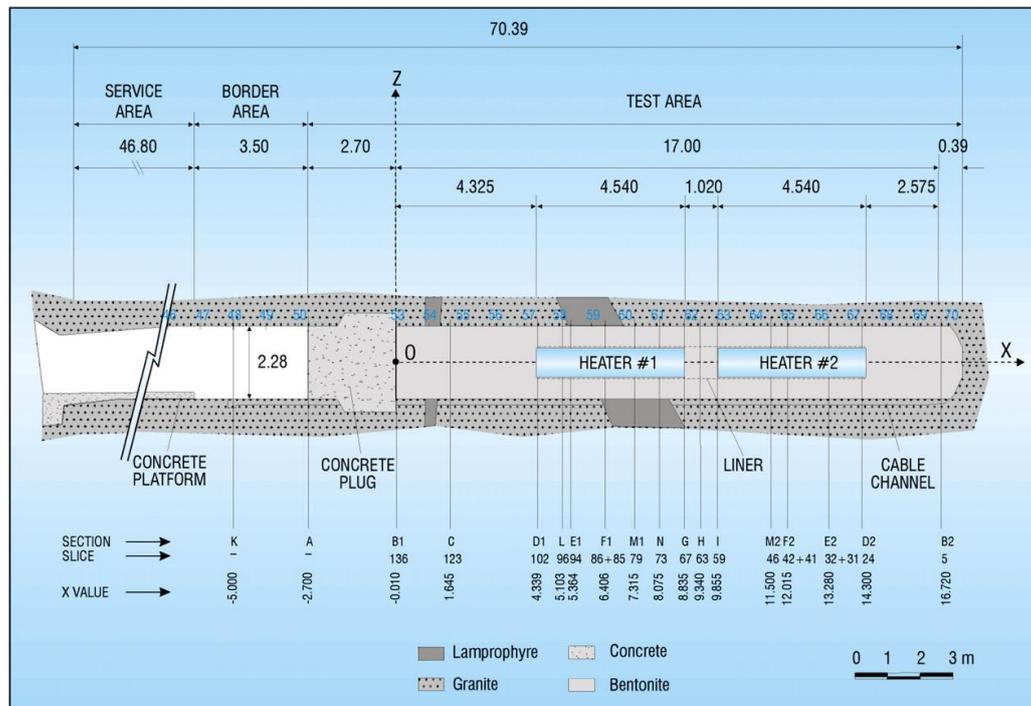


圖 2.46 西班牙現地試驗配置圖

(3) 大型模擬試驗

為一個全尺寸的試驗，如圖 2.47，以水平方式之不銹鋼建構，在內部同樣有 2 個加熱器，長度 1.625 公尺，直徑 0.17 公尺，模擬衰變熱過程，且在底部採加壓進水 (0.5 MPa)，緩衝材料使用 FEBEX 膨潤土，以同心圓塊將加熱器包覆，其餘部分則外加圓塊組成，膨潤土在初始總重為 22.5 噸，平均乾密度 1.65 kg/m^3 ，總孔隙體積佔 6.6%，孔隙將用水填充，增加了初始平均含水量至 17.1%。

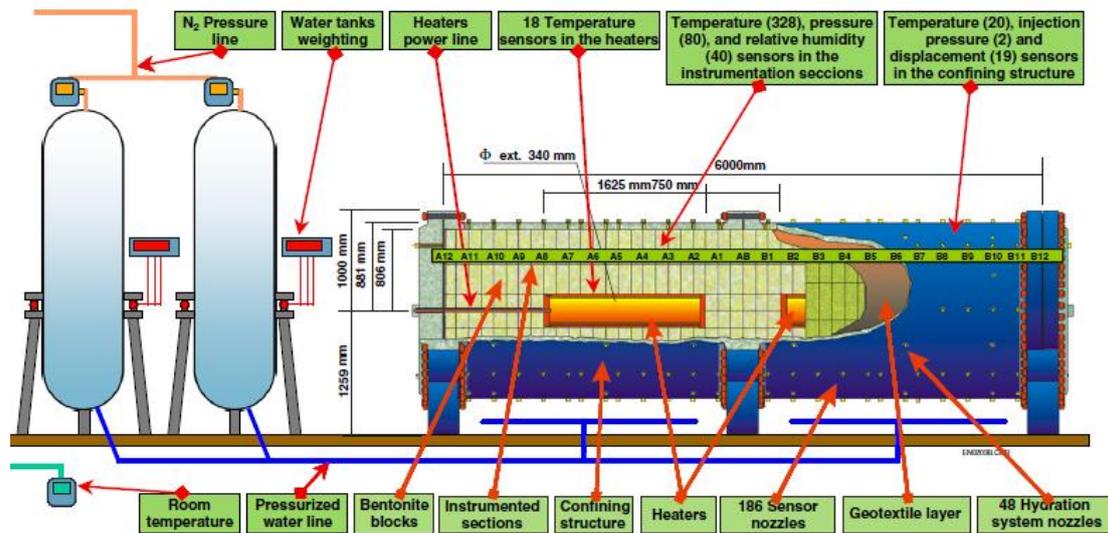


圖 2.47 西班牙大型模擬試驗配置圖

(4) 實驗室試驗

如圖 2，FEBEX 膨潤土壓製高 10 cm，直徑 7 cm 膨潤土塊，初始含水量 13.6%，乾密度為 1.66 kg/m^3 ，堆疊組成高 60cm 試體，底部進行加熱，溫度設定為 100°C ，試體以聚四氟乙烯包覆，避免熱向外消散，在加熱頂部則給予一恆定水壓 1.2 MPa，將溫度設定至 20°C - 30°C ，並在加熱 24-48 小時後開始進水。同時還有不同尺寸為高 40 cm 及高 8 cm，直徑 3.8 cm 試體。

在含水量計算方面，將每段均分成 4 段，以秤重法將試體在 110°C 烘箱 24 小時後秤其重量。

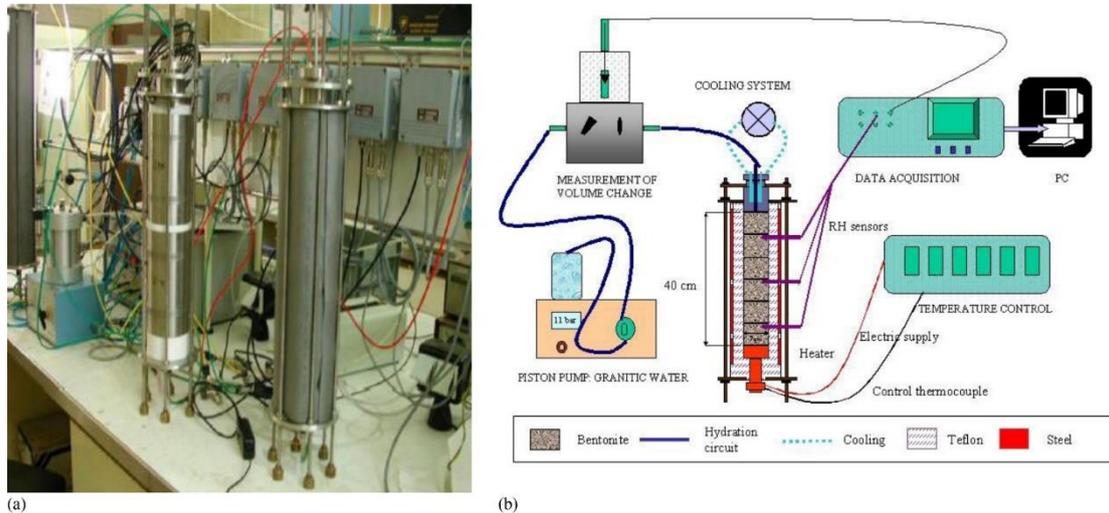


圖 2.50 西班牙試驗室試驗配置圖

2.6.3 模擬試驗結果

現地實驗中，如圖 2.48，靠近加熱器位置，會先受到乾燥，隨著進水，相對濕度才逐漸增加，受加熱器影響較小的地方，相對濕度則慢慢增加直至飽和。

在大型模擬試驗中，如圖 2.49，同樣與現地試驗結果一致。

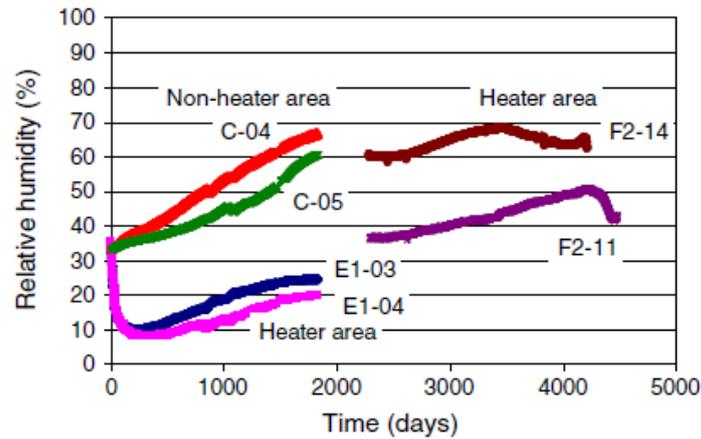


圖 2.48 現地試驗具傳感器 3.5cm 相對濕度變化 (位置參照圖 2.48)

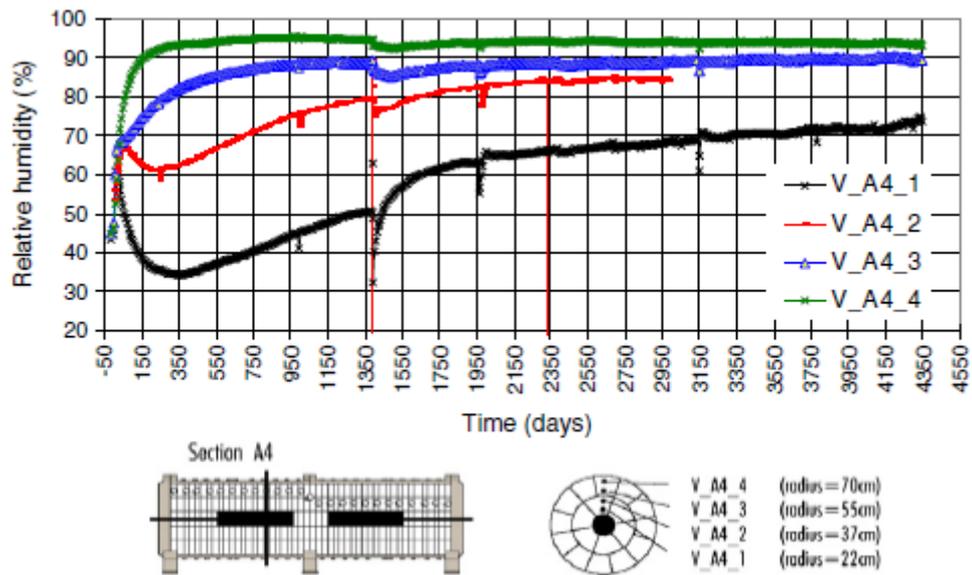


圖 2.49 大型模擬試驗(Section A4)相對濕度變化

由較小的試體能夠觀察到較大的梯度變化，圖 2.50 為 8cm 之試體，發現靠近進水口之含水量遠大於初始含水量，靠近加熱器端，含水量則先乾燥後直至飽和，在乾密度變化部分，一開始進水口端膨潤土受到吸水回脹，導致乾密度下降；相對的，熱源端因受熱乾縮，乾密度提升。

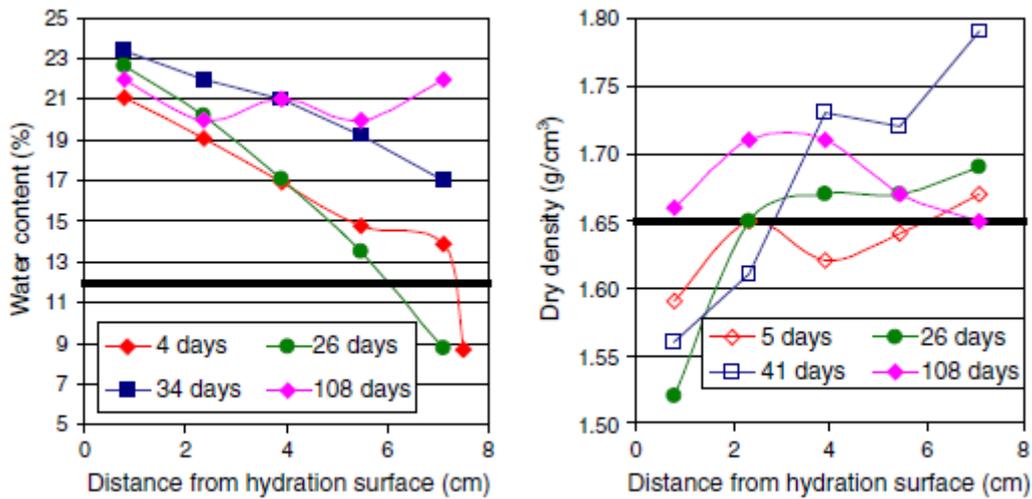


圖 2.50 實驗室試驗 8cm-cell 含水量及乾密度變化

將現地與大型模擬試驗進行比較，雖然 2 個試驗緩衝材料厚度相當，但邊界條件的不同導致有明顯的差異，以溫度為例，如圖 2.51，現地實驗中溫度明顯高於大型模擬試驗，原因可能內部加熱器大小不同，另外現地周圍花崗岩層，大型模擬試驗外圍為金屬，因金屬導熱較快，使得溫度較現地試驗低，但整體趨勢相當，較小的實驗室試驗也具有同樣趨勢。

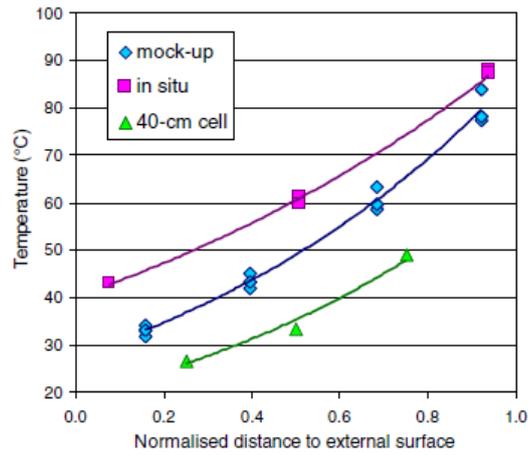


圖 2.51 溫度距加熱器距離變化

2.7 芬蘭模擬試驗

2.7.1 模擬試驗概要

芬蘭輻射與核安全局 STUK 於 2000 年發佈了初步的安全評估報告，選擇 Olkiluoto 作為用過核子燃料的最終處置地點，Posiva 於 2012 年 12 月向當局提交了施工許可證申請。總結了最終處置的長期安全性的論據和結論。模擬如何在 Olkiluoto 基岩條件下，數千年的時間內完成由最終處置罐、膨潤土緩衝材料和處置隧道回填裝置組成的工程屏障系統。最終處置場的建造許可證已於 2015 年 11 月獲得批准。2020 年 Posiva 提出運轉執照申請，且於 2023 年在 Olkiluoto 建設最終處置場並完工啟用，預計將被封存至 2120 年之後。

在最終處置方面，芬蘭已研究超過 40 年，模擬處置概念根據 SKB KBS-3V 多重障壁概念，如圖 2.52，位於 450 公尺深地底下，以垂直方式處置，進行各項小型試驗用已獲得緩衝材料相關參數。

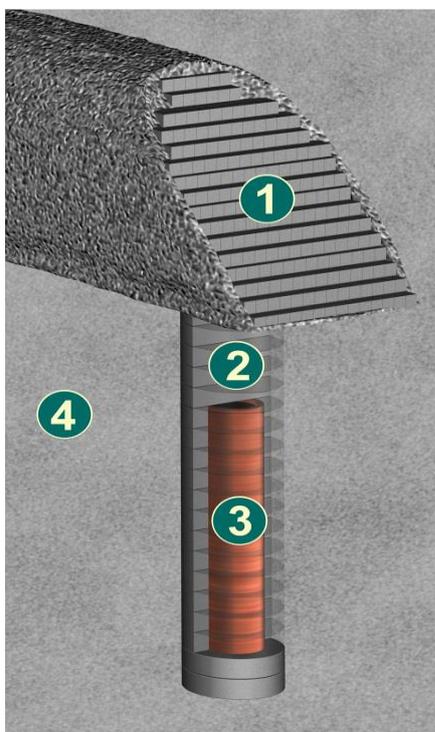


圖 2.52 芬蘭處置概念

2.7.2 試驗配置、材料

(1) 緩衝材料

採用 MX-80 型膨潤土，乾密度分別為 1650 kg/m^3 及 1745 kg/m^3 ，且各有 3 種不同初始飽和度（35%、80%、90%）下進行試驗。

(2) 實驗配置

壓製成長度 76mm，直徑 38mm 的 2 個圓柱試體，與熱源組合成相互對稱的試體，如圖 2.53，在靠近熱源端將溫度設定 60°C - 80°C 之間的溫度，另一端則恆定 30°C ，在試驗期間沒有進水，整個試體以乳膠包覆，提供緩衝材料變形並保持總體含水量不變，且在頂端施加 0.018MPa 垂直應力，使頂端與試體更加密合。

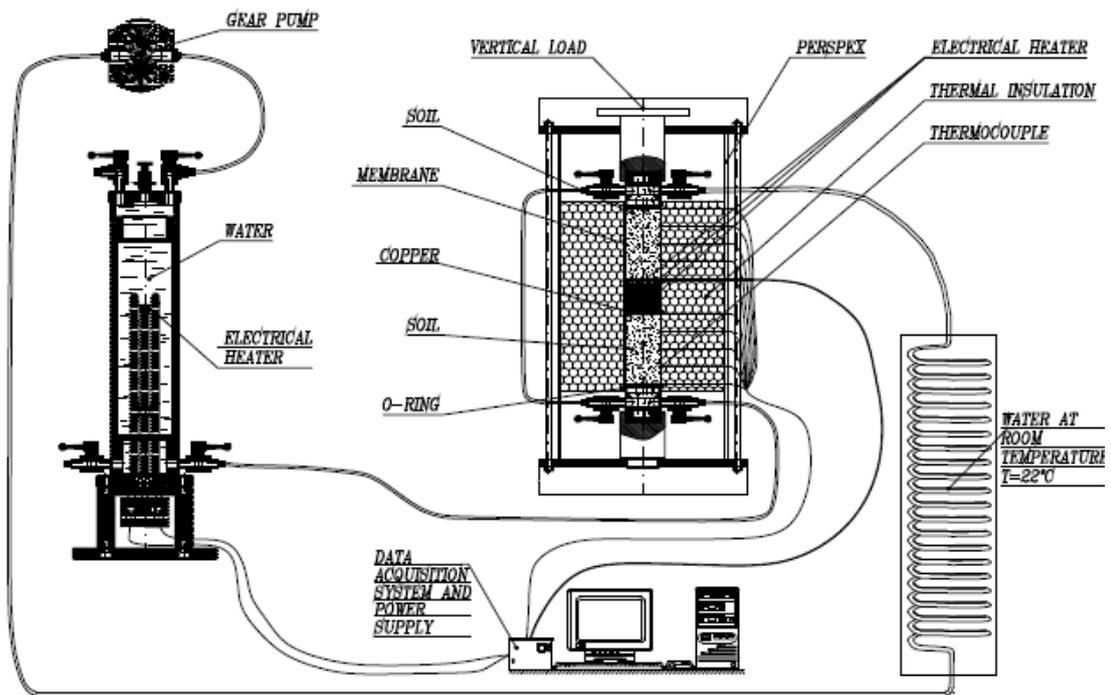


圖 2.53 芬蘭模擬試驗儀器配置

2.7.3 模擬試驗結果

將試體以秤重法置放於 105°C 烘箱下經過 24 小時，以 CEN ISO/TS 17892-2 將試體浸於石蠟油，算其孔隙密度，再利用飽和度計算公式得出飽和度。

在同樣飽和度 35% 下，越高乾密度飽和度變化越慢，如圖 2.54，靠近熱源部分，20 天從 35% 下降至接近 5%，但在 1745 kg/m³ 乾密度，如圖 2.55，達 34 天飽和度才在 10% 以下。在試體完全包覆情形下，沒有水的進出，導致較靠近熱源的水慢慢移到離熱源較遠端，使飽和度持續增加。

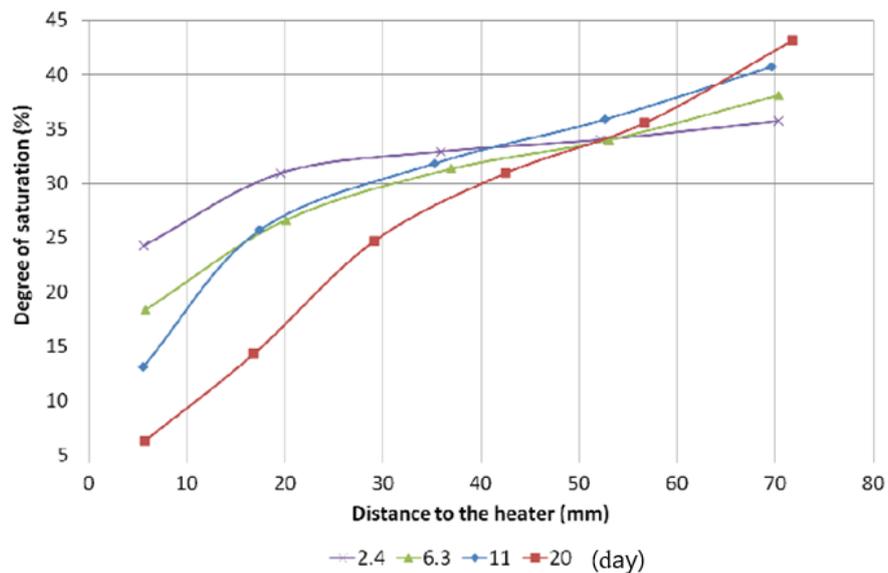


圖 2.54 不同時間之飽和度 (乾密度 1650 kg/m³，飽和度 35%)

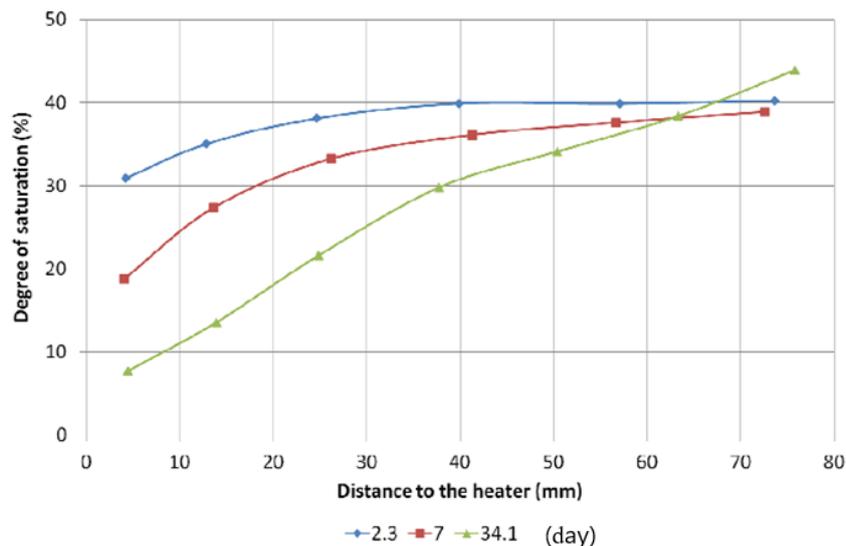


圖 2.55 不同時間之飽和度 (乾密度 1745 kg/m³，飽和度 35%)

同樣地，在接近完全飽和度情況下，飽和度變化更慢，如圖 2.56，6.2 天已達到飽和度 95%，且變化較為明顯，但在較高的乾密度下，如圖 2.，水較難以傳遞，在 6.9 天，遠離熱源地方沒有較明顯變化。

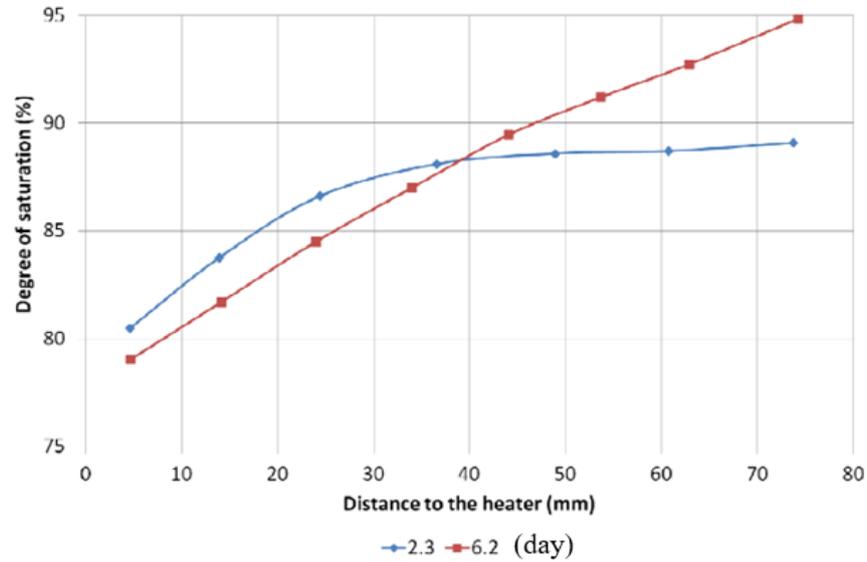


圖 2.56 不同時間之飽和度（乾密度 1645 kg/m^3 ，飽和度 90%）

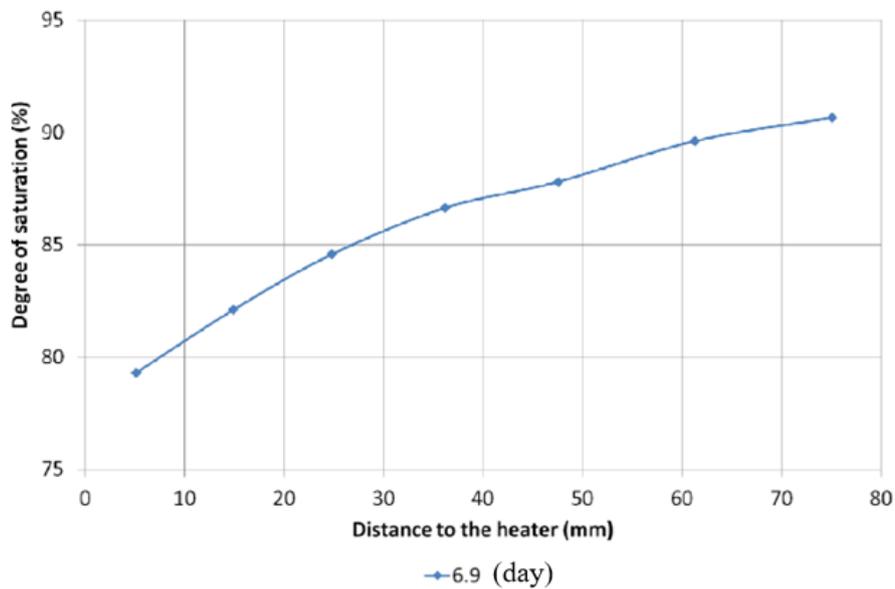


圖 2.60 不同時間之飽和度（乾密度 1745 kg/m^3 ，飽和度 90%）

位移變化部分利用測量初始直徑的同一點測量試體直徑的變化，在靠近熱源地方，因含水量降低，飽和度下降，使得膨潤土因此乾縮，而遠離熱源地方，飽和度增加，受到膨潤土吸水膨脹特性影響，使之向外膨脹，在不同乾密度下，如圖 2.57、圖 2.58，越高的乾密度，位移的變化越小。

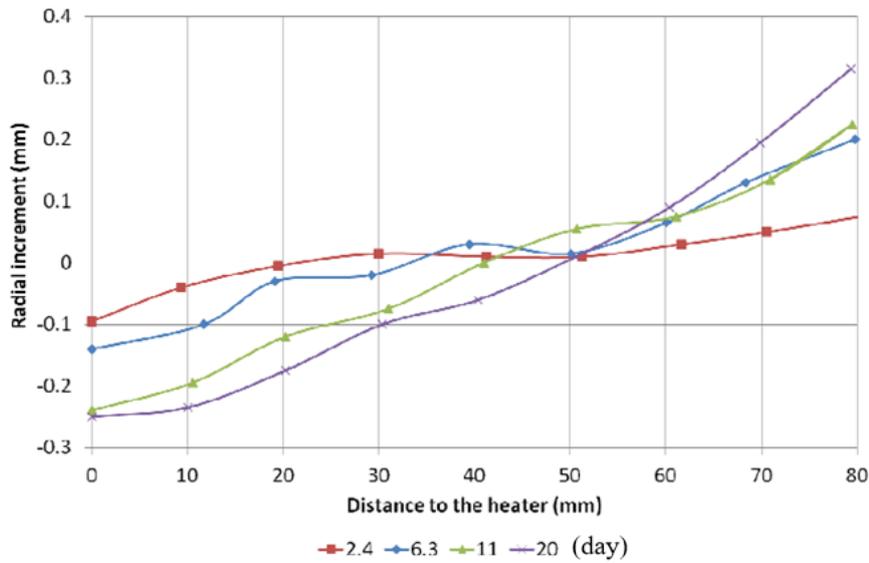


圖 2.57 不同時間之直徑變化量（乾密度 1650 kg/m^3 ，飽和度 35%）

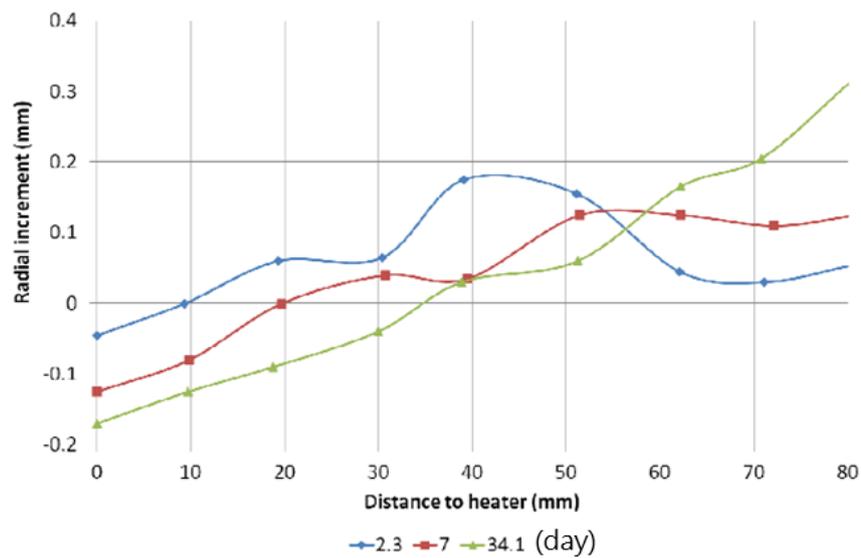


圖 2.58 不同時間之直徑變化量（乾密度 1745 kg/m^3 ，飽和度 35%）

而在接近完全飽和的情形下，膨潤土幾乎已無回脹，如圖 2.59 顯示出直徑之變化量，在靠近熱源因遇熱乾縮的影響，使得試體往內縮，如圖 2.60，在乾密度 1745 kg/m^3 下一樣有乾縮現象，但相對於乾密度 1650 kg/m^3 來的變化較小。

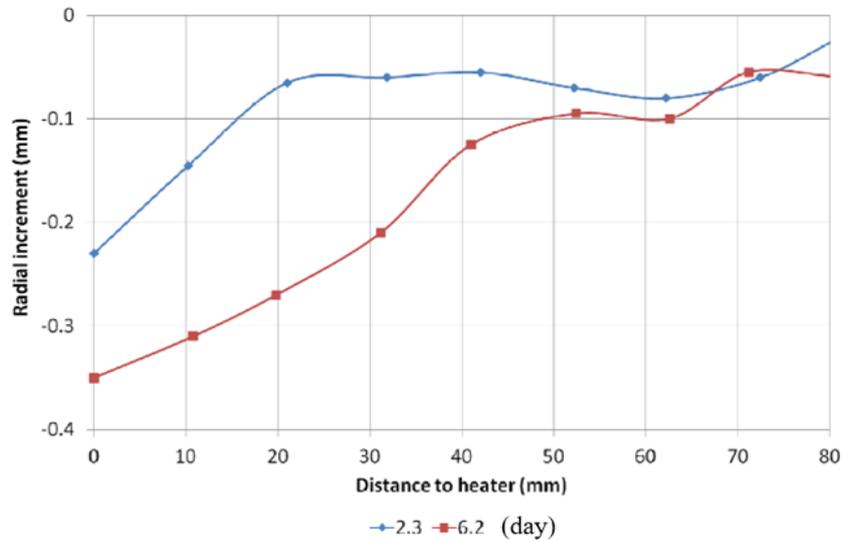


圖 2.59 不同時間之直徑變化量（乾密度 1650 kg/m^3 ，飽和度 90%）

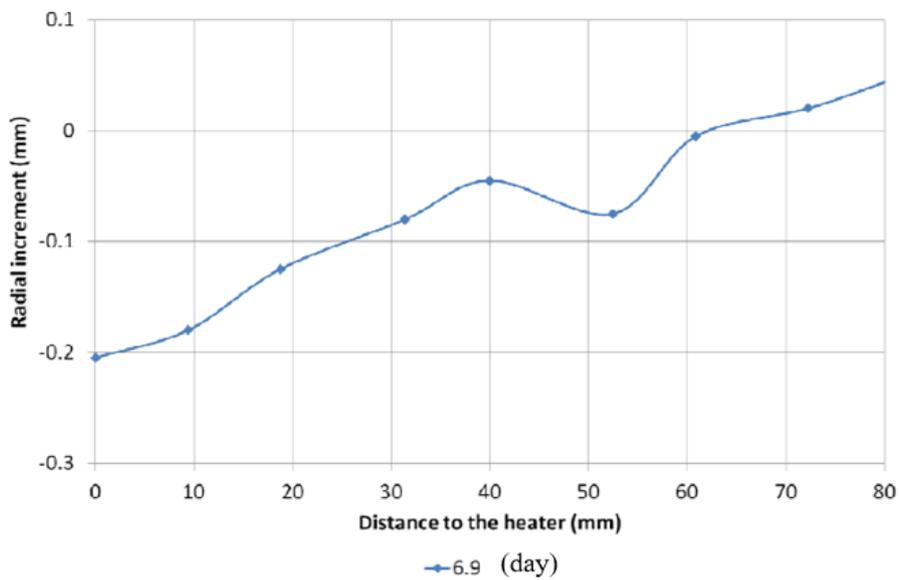


圖 2.60 不同時間之直徑變化量（乾密度 1745 kg/m^3 ，飽和度 90%）

第三章 回脹壓力試驗

3.1 實驗介紹

用過核子燃料在最終處置場的近場效應主要受到耦合效應因素影響，然而這些耦合效應對多重障壁系統的劣化有直接的影響，如緩衝材料的裂化、處置罐受到回脹行為推擠位移等，上述相關試驗也發現因回脹造成之推擠位移。因此，本子計畫針對緩衝材料的回脹行為作深入探討，分別對處置場可能遭遇的情況，如地下水侵入、高鹼性環境、衰變熱及不同垂直應力等因子，建立相關研究成果，以提供未來最終處置設施設計依據或安全評估的參考項目。

目前國際間普遍採用恆定體積回脹壓力試驗，試驗儀器部分參考國際岩石力學學會 (International Society for Rock Mechanics, ISRM) 相關建議設計，另外 SKB 相關文獻中也有較完整的設置及介紹，根據 SKB TR-12-02 (2011) 的試驗主要分為三種回脹壓力試驗：軸向、逕向向內及逕向向外三種方式進行，如圖 3.1，而此研究進行軸向回脹壓力試驗，參考 SKB 及國際間恆定體積回脹壓力試驗模

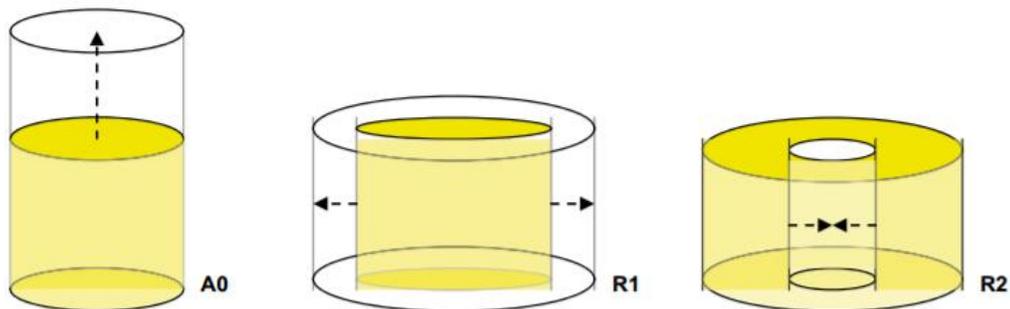


圖 3.1 SKB 回脹壓力試驗 (A0 軸向、R1 逕向向外、R2 逕向向內)

此研究分為兩階段進行探討，第一階段：探討用過核子燃料在最終處置場可能會遭遇到海水或地下水的入侵，利用不同滲透液與緩衝材料交互作用，進行回脹壓力與水力傳導試驗，模擬緩衝材料遭遇到不同滲透液下的回脹行為，而模擬近場的環境因子如下：

(1) 衰變熱效應

由於最終處置場封閉後，將受到用過核子燃料之衰變熱影響使近場環境處於高溫狀態下，此時當地下水入侵後，整體系統會呈現水-熱環境，因此本研究針對 25°C 與 65°C 之熱環境模擬當地下水入侵後，處置區域形成水-熱環境系統對緩衝材料回脹行為影響。

(2) 地下水化學效應

當海水入侵到最終處置場之近場環境時，其地下水化學主要為 Na-Ca-Cl 系統，因此本研究探討不同濃度的 NaCl 與 CaCl₂ 兩種溶液來模擬海水入侵對緩衝材料回脹行為之改變。

根據 ASTM 標準人工海水備製規範 (D1141)，模擬之 NaCl 含量為 24.53 g/L，故採用 0.6 M 的 NaCl 來簡化模擬海水，提高至 1.0 M 探討高濃度 Na 離子對膨潤土回脹之影響。

(3) pH值效應

在用過核子燃料最終處置場中，為了解混凝土與膨潤土之間互制行為，因此模擬當地下水入侵混凝土後所夾帶高鹼性溶液可能與緩衝材料之間互相作用，影響緩衝材料之預期回脹能力。故本研究採用 NaOH 與 Ca(OH)₂ 兩種溶液，利用 OH⁻離子濃度越大其 pH 值越大來模擬緩衝材料處於高鹼性的環境下，探討對回脹行為的影響。

第二階段：當最終處置場封閉後，用過核子燃料罐處置孔周圍的緩衝材料將會受到上部回填材料的自重及回脹壓力影響，對緩衝材料而言將會受到垂直向下的應力。因此本研究將探討緩衝材料受到不同垂直應力〔0.1 MPa、0.4 MPa〕對回脹行為的影響，垂直應力 0.1 MPa 因子為模擬處置場封閉後，初期由回填材料

自重給定的垂直應力，0.4 MPa 因子則是模擬處置場在長期營運期間，可能遭受到地下水入侵，使得回填材料逐漸飽和因而膨脹產生回脹壓力。另外，再利用 NaCl [0.6 M] 溶液模擬海水入侵與垂直應力相互作用之情形做探討，進而評估近場環境的變化。

3.2 實驗材料、試體

此研究所使用為美國懷俄明州的膨潤土(Volclay Bentonite SPV)，由 BlackHill 公司所開採生產，簡稱 SPV200 膨潤土，如圖 3.1 所示。而 SPV200 膨潤土的可交換陽離子以 Na⁺為主，屬於鈉型膨潤土，組成以蒙脫石、長石、黑雲母及石膏等礦物，其中蒙脫石含量約 90 %。詳細規格如下表：

表 3-1SPV 200 膨潤土成份分析表

Elemental Analysis	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	LOI	Al ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	Trace
%	63.02	3.25	2.67	0.65	5.64	21.08	0.35	2.57	0.72

採用的回脹試體尺寸為直徑 60 mm、厚度 12 mm，設計乾密度為 1600 kg/m³。將所需重量的膨潤土置於模具中，表面整平後承壓柱放置正中央，利用萬能試驗機以靜態壓實法來製作所需乾密度的試體。壓製的模具如圖 3.2 所示。

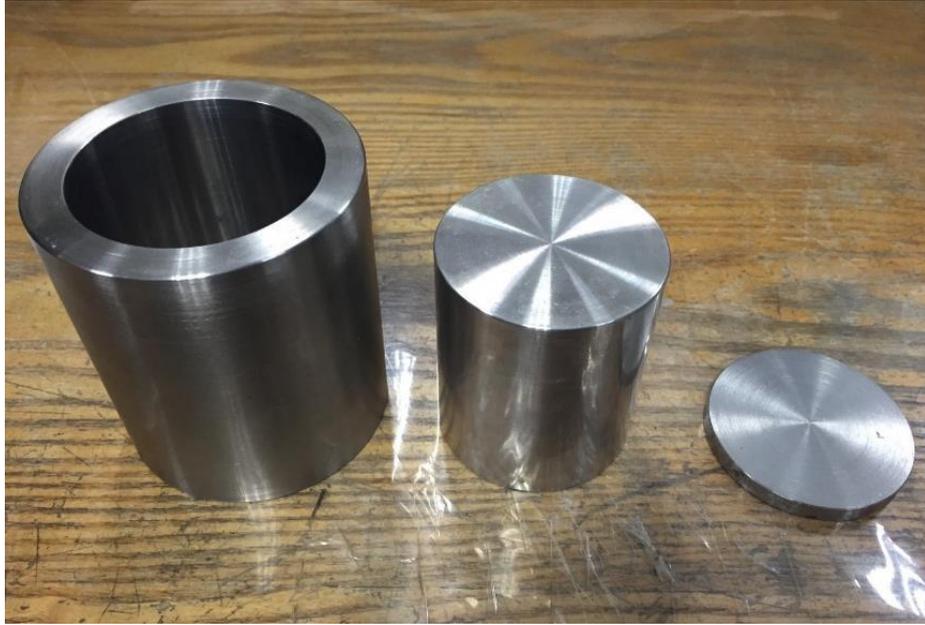


圖 3.2 膨潤土試體壓製模具

在完成壓製後，依 ISRM (1981) 的建議方法對試體進行檢驗，即以測微尺量測試體任意三點厚度，而厚度皆須維持在正負 0.1mm 誤差之內。完成壓製的試體會在 30 分鐘內進行實驗。

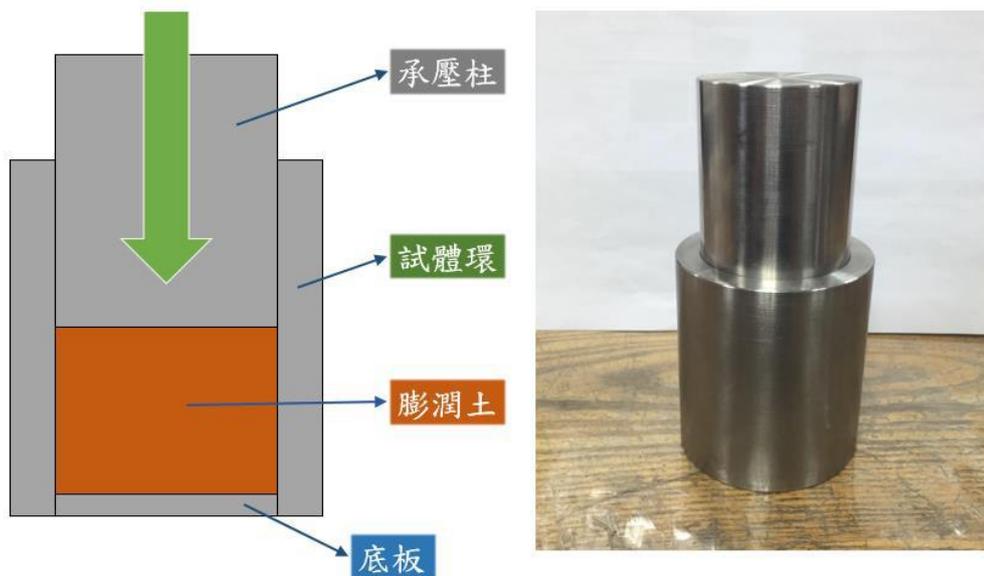


圖 3.3 膨潤土試體壓實流程

3.3 實驗儀器配置、方法

(一) 定體積回脹壓力試驗

研究所使用之回脹壓力及水力傳導試驗模具為參考目前國際相關研究所使用的試驗模具，並加以改良設計，如圖 3.4。

回脹壓力所採用之資料記錄器為高擎公司所進口之儀器，型號為 GTT2006-A00110，具有 6 點類比輸出、10 毫秒的採樣速率及資料存取速度，荷重元安裝於頂板上並連接於顯示器，儀器購自 ESENSE 公司，顯示器型號為 JS-2000，並針對荷重元所設計。荷重元為 LM-3T，如圖 3.5。

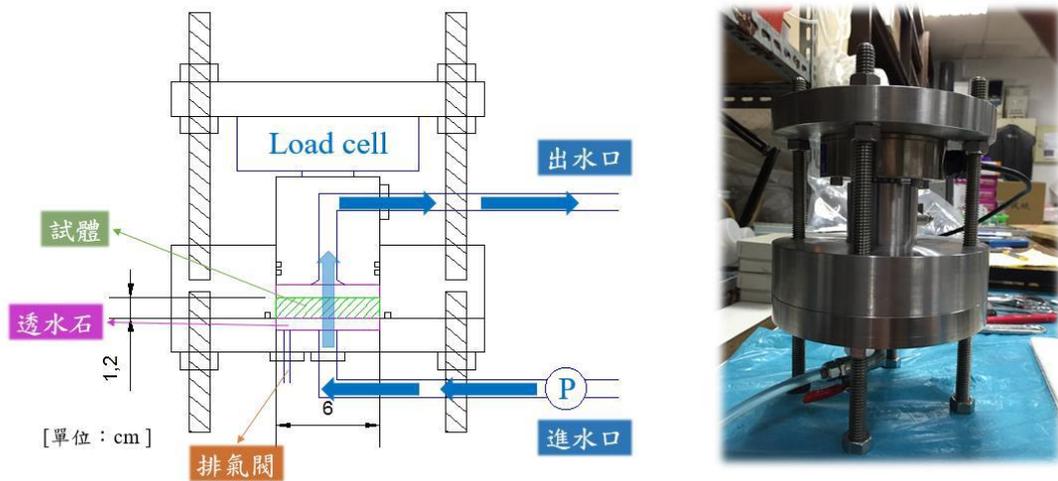


圖 3.4 回脹壓力與水力傳導試驗示意圖



圖 3.5 荷重元與資料顯示器

試驗詳細配置如圖，主要利用氣-液轉換系統的方式，透過高壓氮氣鋼瓶連接氣液轉換柱，使氣壓轉換成液壓(11 kgf/cm²)，再將其連接到模具底下的進水口，透過給定的液壓進行滲透並記錄回脹壓力隨時間變化。

因為此試驗為定體積下的回脹壓力，若試體達到飽和狀態，荷重元顯示的讀數趨於定值時，則完成此次的回脹壓力試驗。其回脹壓力的計算方式如下：

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{式 3.1})$$

式中 σ =定體積下回脹壓力

F=量測之軸向力

A=試體之截面積

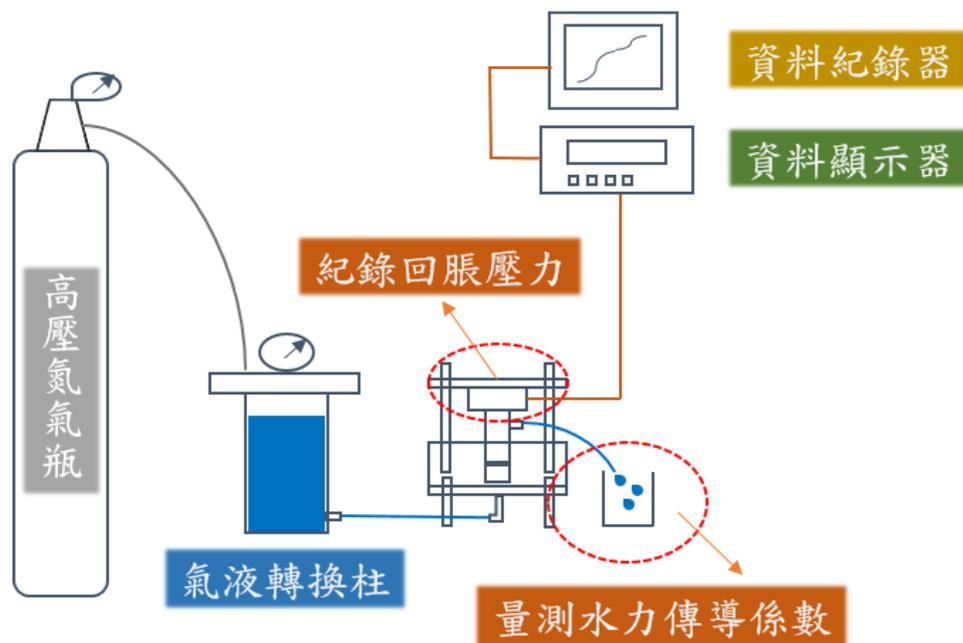


圖 3.6 試驗配置圖

(二) 單向度回脹試驗

如同回脹壓力試驗儀器加以設計改良，將實驗模具放置水槽內，且水位必須高於試體，利用懸掛的方式將荷重掛上，達到所需的垂直應力，以模擬不同垂直應力之單向度回脹試驗，試驗如圖 3.7。

當膨潤土與溶液接觸後會迅速的發展回脹，此時利用測微計量測回脹量並記錄時間，繪製回脹應變量與時間之關係。當回脹量趨於穩定時即完成此試驗。

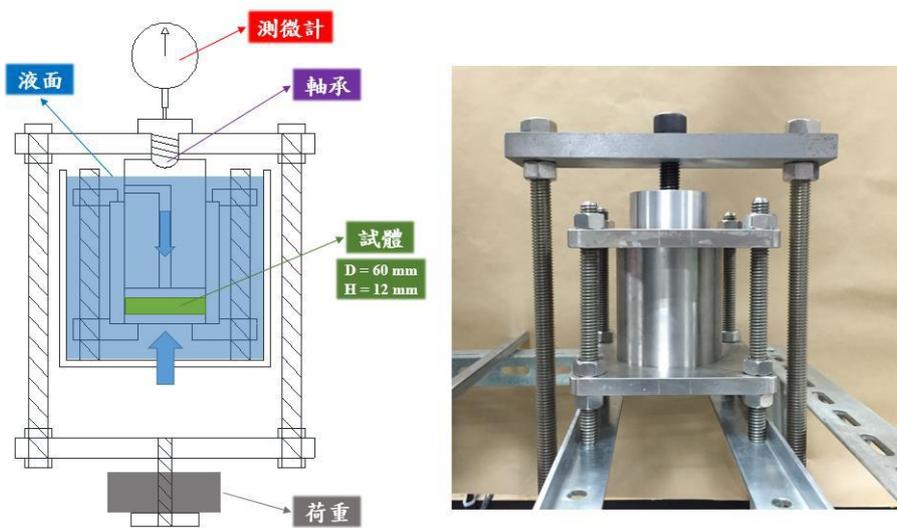


圖 3.7 附載荷重之單向度回脹試驗示意圖

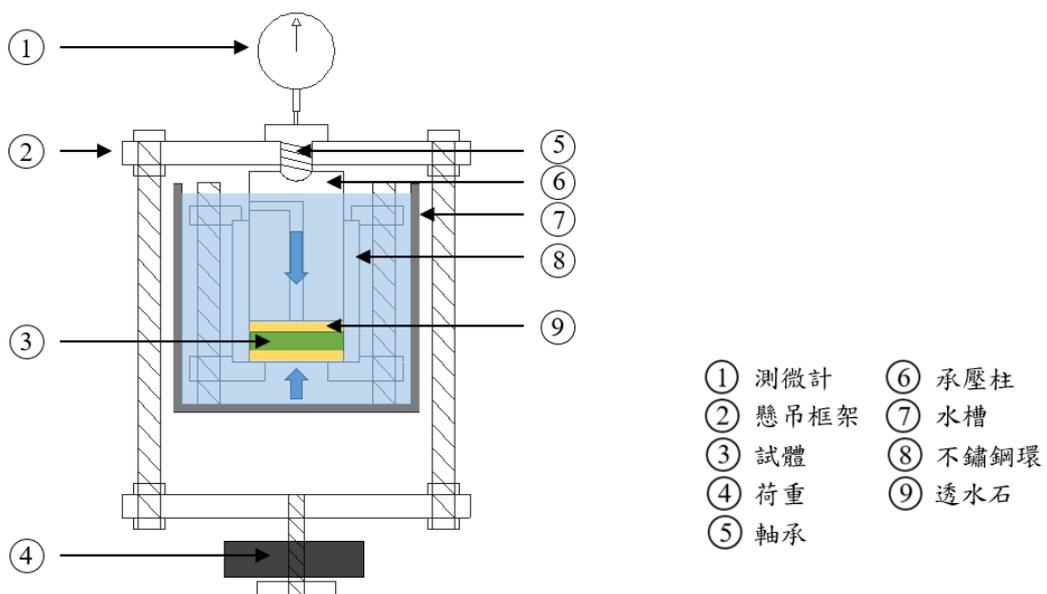


圖 3.8 單向度回脹試驗儀器

3.3 試驗結果

膨潤土於定體積下進行回脹壓力試驗，其回脹壓力歷時曲線如圖 3.9 所示。Zhu (2013) 研究中解釋壓實膨潤土於定體積下之回脹行為過程，如圖 3.10，其過程主要分為三階段：第一階段當膨潤土與水接觸後，將迅速發展晶格回脹，使回脹壓力達到第一個峰值(Stage I)。第二階段為聚集體(aggregate)持續回脹，但由於定體積的條件將導致土壤架構崩解，因此造成回脹壓力降低 (Stage I → II)，主要為較厚的土壤晶體因崩解而形成較薄的聚集物，並填滿團粒間孔隙(Inter-aggregate pore)。最後第三階段主要為較薄的聚集物於團粒間孔隙再次回脹並填其餘孔隙，其回脹機制主要以擴散雙層斥力為主，使得回脹壓力逐漸增加至最終穩定值(Stage III)。

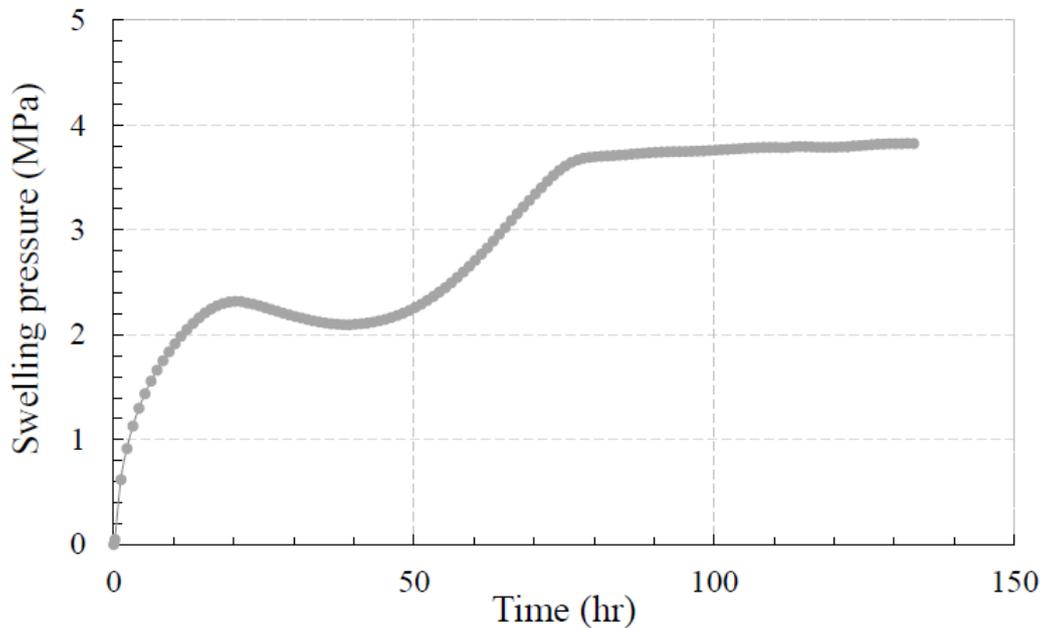


圖 3.9 典型回脹壓力歷時曲線 (SPV 200 Bentonite 1600 kg/m³)

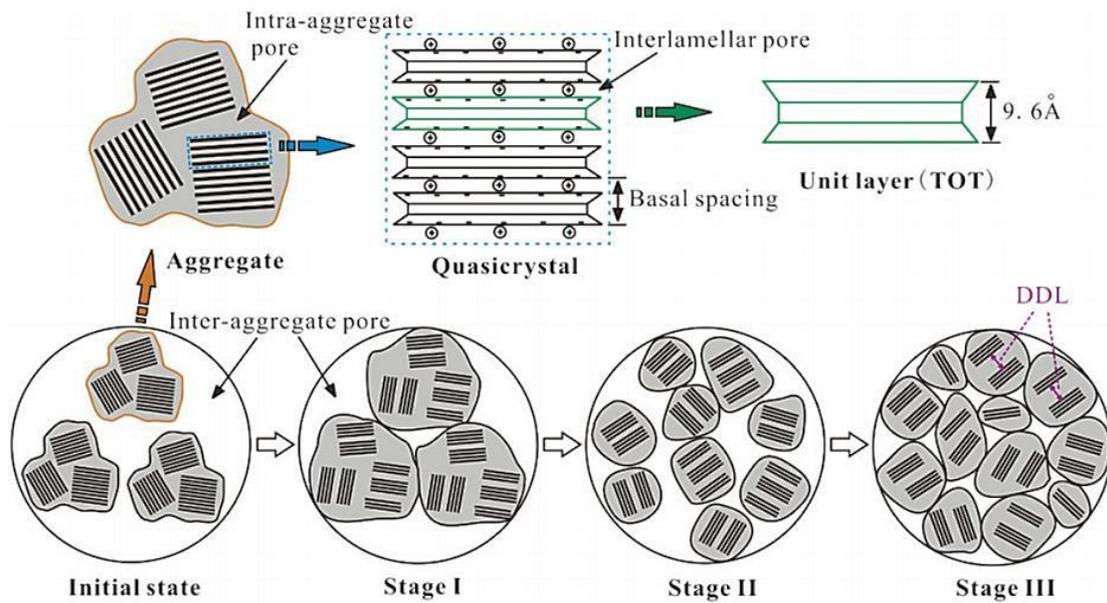


圖 3.10 壓實膨潤土之定體積回脹過程 (Zhu, 2013)

(1) 定體積回脹壓力-衰變熱效應

在 25 度水-熱環境下，回脹壓力歷時曲線呈現典型的雙峰曲線，回脹的過程約在 80 小時趨於穩定，最終回脹壓力 3.82 MPa。當溫度在 65 度下，整個回脹的過程會加快，且回脹穩定的時間也提前，相較之下穩定時間提前約 37%，使得回脹壓力迅速的發展，但最終的回脹壓力比在 25 度的 3.82 MPa 下降至 2.88 MPa。

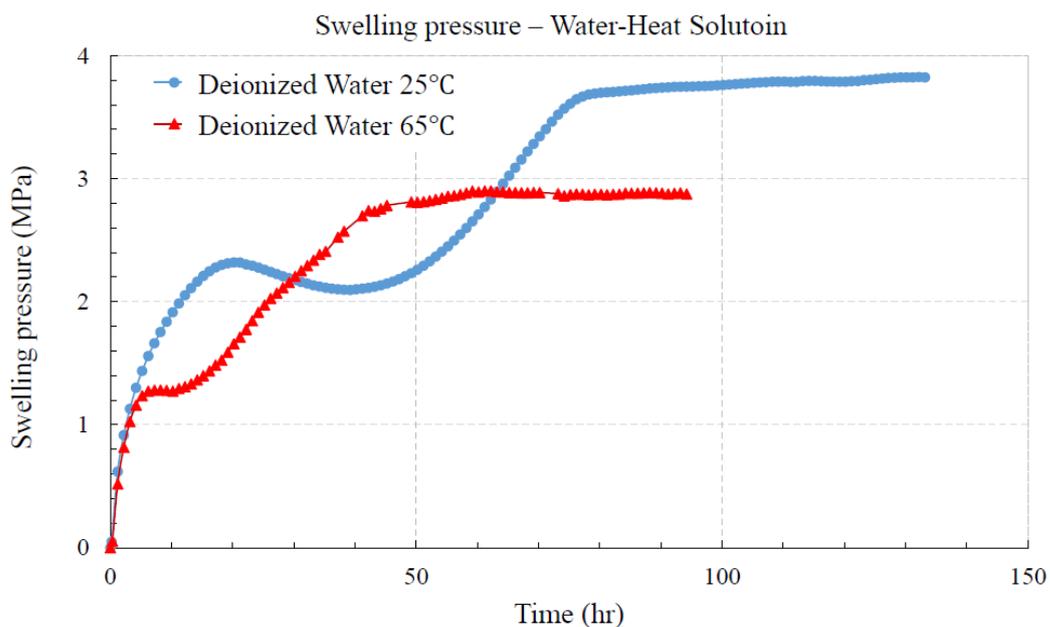


圖 3.11 不同水-熱近場環境下緩衝材料回脹壓力歷時曲線

圖 3.12 顯示在 65 度水-熱環境下 100 小時後回脹試驗後取出的試體外觀，可以發現側面有許多的裂縫，而裂縫產生為處在高溫下且在層間較不穩定所造成。



圖 3.12 65°C 水-熱環境後之外觀 (側面產生裂縫)

(2) 定體積回脹壓力試驗-地下水化學效應

在濃度 0.6 M 的 NaCl 溶液下，回脹壓力由典型的雙峰曲線逐漸變為單峰曲線，此溶液影響了回脹過程，最終的回脹壓力從 3.82 MPa 下降至 2.59 MPa，當濃度提升至 1.0 M 時，圖 3.13 顯示出曲線明顯的壓縮第二個回脹峰值發展，使最終的回脹壓力降為 1.82 MPa。

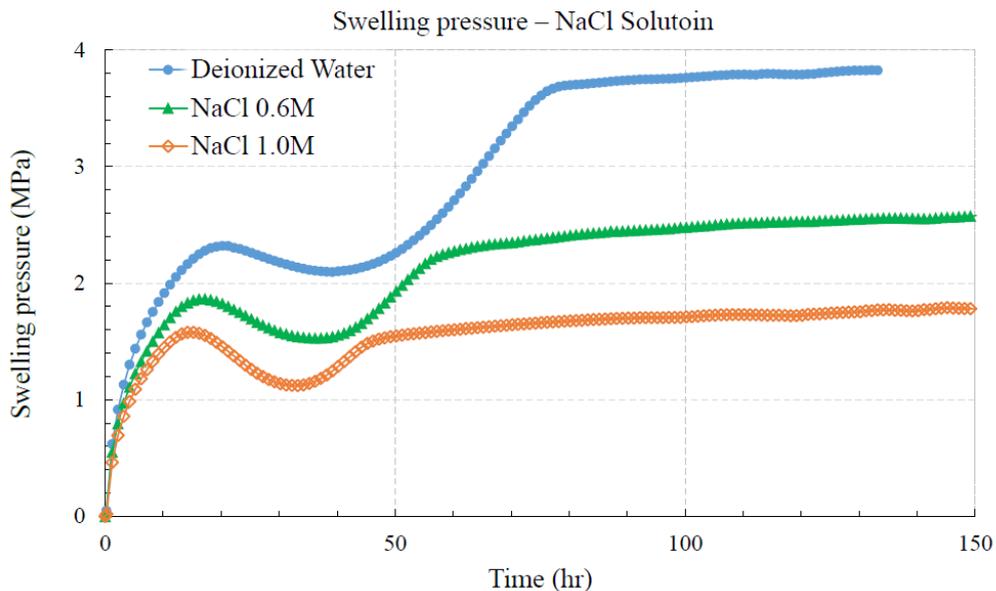


圖 3.13 不同 NaCl 濃度之回脹壓力歷時曲線

另外 CaCl_2 溶液下的回脹壓力試驗，一樣使用 0.6M 及 1.0M 的濃度，其試驗結果如圖 3.14，發現與 NaCl 溶液下的曲線相近，但最終的回脹壓力分別為 2.8 MPa 及 2.36 MPa，相較於 NaCl 溶液下降的幅度相對來的小，表示膨潤土受到 CaCl_2 的影響較小。

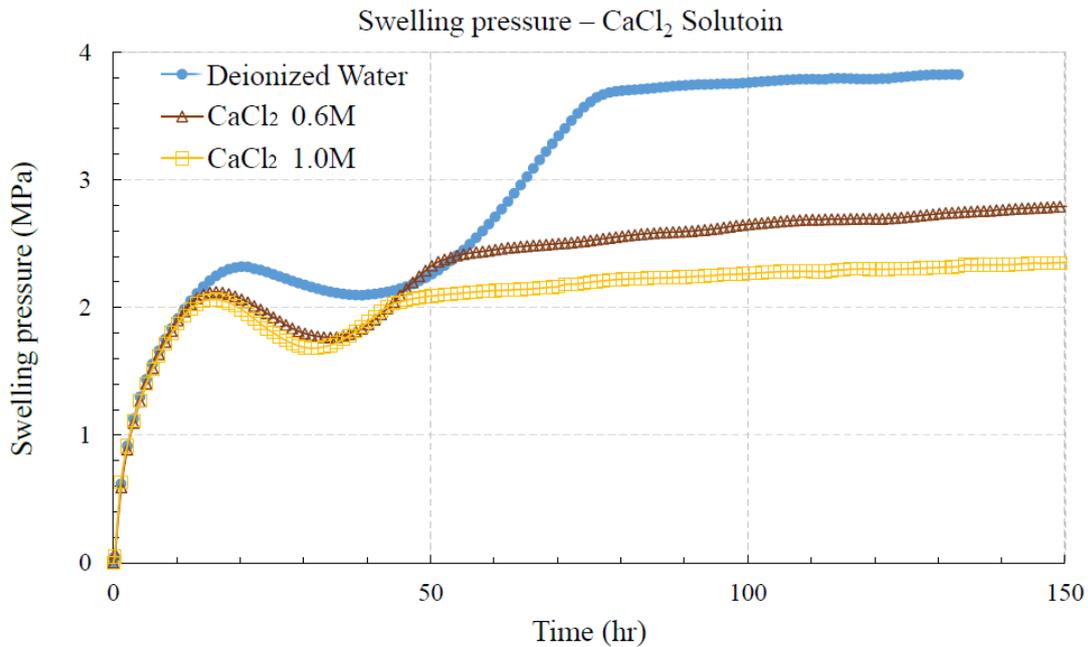


圖 3.14 不同 CaCl_2 濃度之回脹壓力歷時曲線

(3) 定體積回脹壓力試驗-pH 效應

此實驗研究所採用的 NaOH 溶液濃度分別為 0.1 M、0.6 M 及 1.0 M，pH 值分別為 12.97、13.56、13.83，由於 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 屬於微溶性，所以將濃度調節到 0.02 M，pH 值為 12.47，分別探討鹼性溶液對緩衝材料的影響。

根據 Ye(2014)提出膨潤土之回脹壓力會受到 NaOH 溶液之 pH 值影響，pH 值越高而回脹壓力會越小，主要原因 pH 值增加會造膨潤土內蒙脫石溶解量增加。而透過膨潤土與高濃度的 OH 離子反應(Savage and Benbow, 2007)，如下式，膨潤土內的蒙脫石會因高濃度 OH 離子而溶解，導致回脹壓力永久的降低。而 Karmland (2007) 研究則指出當溶液 pH 值小於 13 時，對膨潤土的回脹壓力不會有太大的影響。

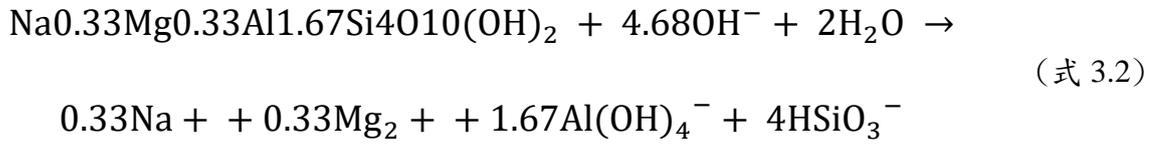


圖 3.15 不同 NaOH 濃度之回脹壓力歷時曲線顯示 0.1 M 之 NaOH，回脹壓力歷時曲線與在 25 度水系統下差異不大，回脹壓力在第一個峰值表現從 2.32 略降至 2.14 MPa，而最後回脹壓力為 3.73 MPa，但當濃度提升至 0.6 M 時，回脹壓力在第二個峰值時穩定的時間延長，約增加了 25%，而回脹壓力則下降了 14%，最終的回脹壓力為 3.27 MPa，在濃度為 1.0 M 時，穩定時間的延後更為明顯，延長需達 130 小時，最終的回脹壓力也下降至 3.07 MPa。

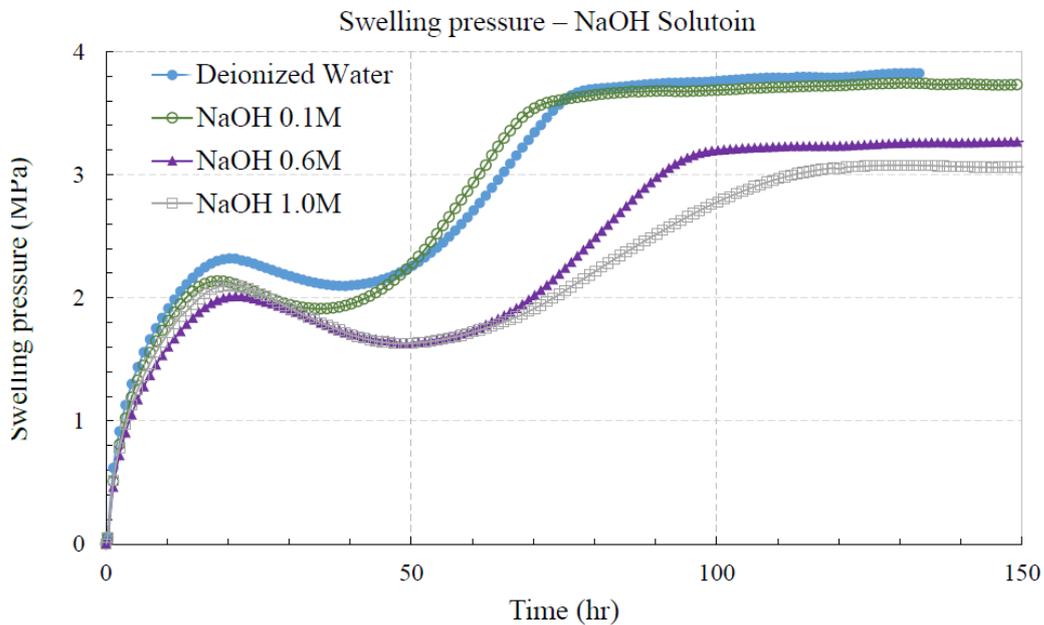


圖 3.15 不同 NaOH 濃度之回脹壓力歷時曲線

Ca(OH)₂ 0.02 M 的溶液下，因 pH 值為 12.47，由圖 3.16 顯示在 pH 小於 13 的情況下，回脹壓力曲線並無太大的差異，最終的回脹壓力只受些微影響。

由實驗顯示出當 OH⁻ 離子濃度越大其 pH 值梯度越大，使 OH⁻ 離子擴散能力增加，影響回脹壓力越明顯。

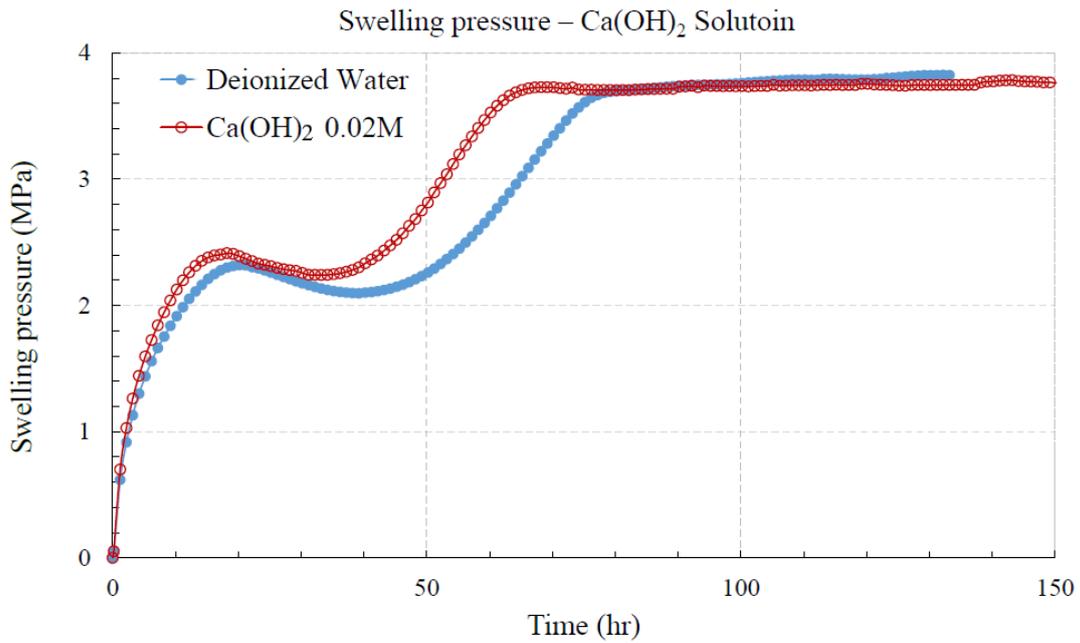


圖 3.16 膨潤土於 Ca(OH)₂ 之回脹壓力歷時曲線

在單向度回脹試驗 25 度水溫系統下，分別進行不同垂直應力下〔0.1MPa、0.4MPa〕對回脹應變之影響，由圖 3.17 所示，在 1~100 小時之間為主要回脹過程，在 0.1MPa 垂直應力下，最終回脹應變為 82.99%，〔初始高度為 12mm〕，在 0.4MPa 垂直應力下最終回脹應變為 35.68%，由試驗結果可知當垂直應力提高時，明顯限制膨潤土的回脹能力。

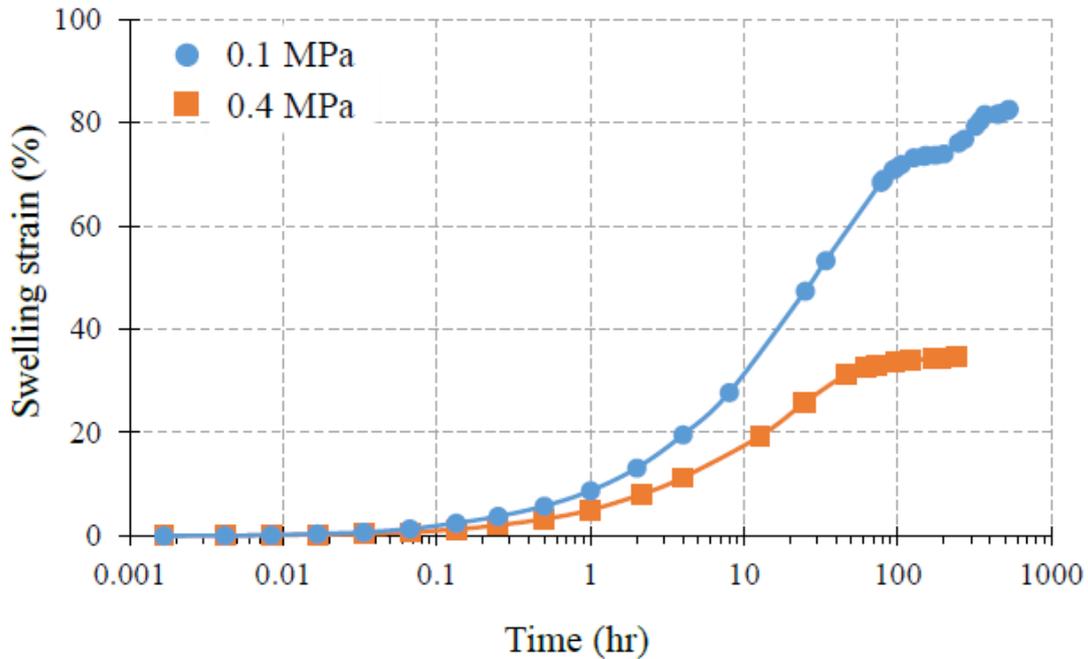


圖 3.17 膨潤土於 25 度水系統中不同垂直應力之回脹歷時曲線

在 NaCl〔0.6M〕溶液中，分別以 0.1MPa、0.4MPa 垂直應力下探討對回脹應變之影響，在 0.1MPa 垂直應力下，相較於水溫系統下回脹應變從 82.99% 變為 37.18%，如圖 3.18，明顯影響膨潤土回脹能力，主要原因 Na^+ 迅速進入膨潤土間，使回脹應變減小。

當隨著垂直應力提升至 0.4MPa 時，最終回脹應變為 23.58%，相較於 0.1MPa 中，回脹應變從 35.68% 降至 23.58%，如圖 3.19，明顯發現當垂直應力為 0.4MPa 時，使得膨潤土在水與 NaCl〔0.6M〕兩者系統下之最終回脹應變下降程度較小，主要為較大的垂直應力導致溶液中的陽離子無法有效的進入膨潤土內部，因此垂直應力越高，將使得 NaCl 溶液入侵對膨潤土回脹之影響程度越小。

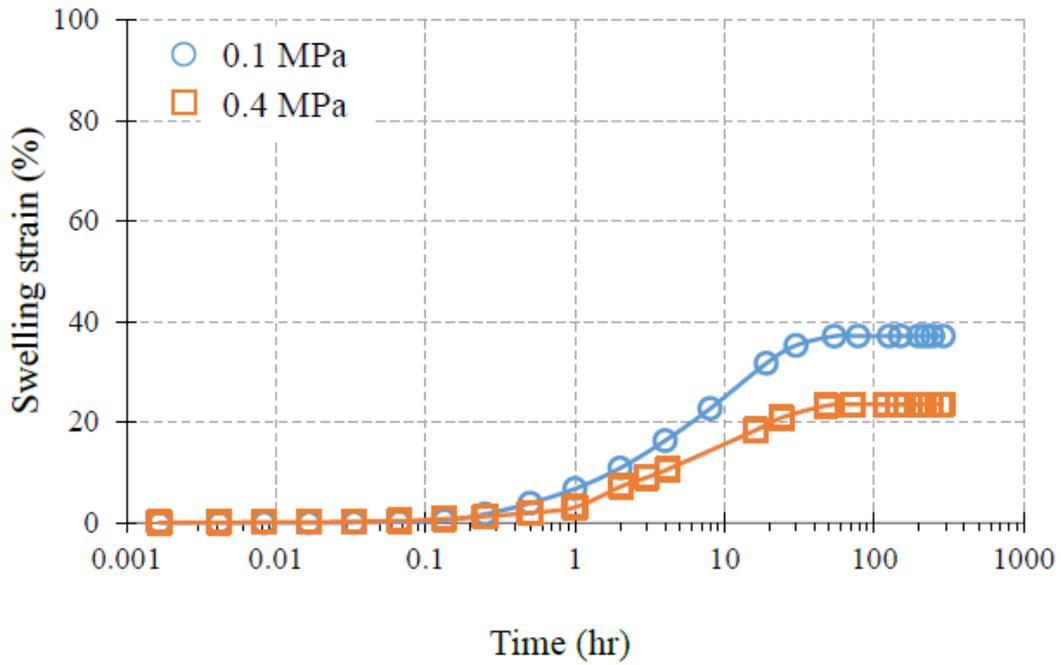


圖 3.18 膨潤土於 NaCl[0.6M]系統中不同垂直應力之回脹歷時曲線

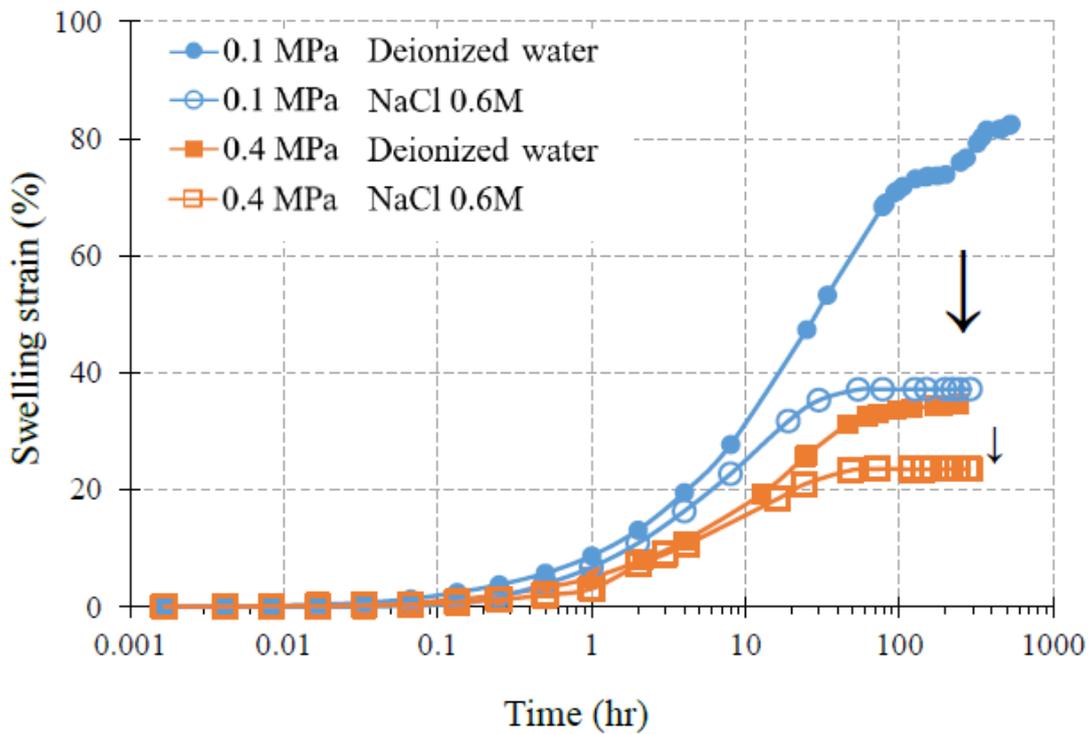


圖 3.19 膨潤土於 NaCl[0.6M]系統中不同垂直應力之回脹歷時曲線

第四章 小型熱-水耦合試驗

用過核子燃料最終處置場近場環境會在置入廢料罐之前先抽乾地下水，故處置場初期緩衝材料之含水量為自然體積含水量，在處置開始後近場周圍之地下水會逐漸回注並開始入侵緩衝材料，使緩衝材料含水量增加並逐漸趨於飽和，而各國均積極地進行大型模擬試驗，已獲得良好的經驗及數據，但由於我國尚在起步階段，希望先行以小型試驗開始，透過建立小型熱-水耦合模型，收集實驗參數。105 年度計畫之 T-H 耦合效應量測已透過採用時域反射儀-TDR 系統與溫度分佈系統，可即時量測緩衝材含水量與溫度分佈之歷時變化。而今年計畫部分已完成三相圖，透過三相圖之 TDR 系統量測之介電常數、溫度及體積含水量關係，進行在不同溫度下小型熱-水耦合模型試驗，並觀察緩衝材料在不同含水量之歷時變化。另外，也透過 TDR 感測器改良，使後續數據處理上更顯容易。

4.1 實驗材料、試體

(1) 實驗材料

材料選用與回脹壓力試驗相同的 SPV200 膨潤土，詳細規格如表 3-1：

(2) 實驗試體

採用分裂模的觀念，設計於分裂內模的外圍利用圓形不鏽鋼圈(外束環)加以束制，以達到使兩半圓柱土體密合的效果。經由土體間隙測試及耦合回脹測試，結果發現分裂外模不僅可以使兩土體中間達到近乎無間隙，同時也發揮了良好的束制效果，試體壓製完成隨後開始進行試驗。

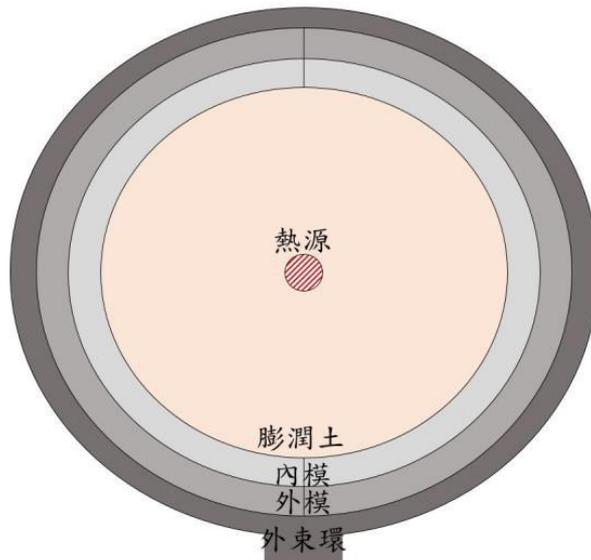


圖 4.1 試體俯視示意圖(未按比例)

如圖 4.2 將秤好所需設計之乾密度的膨潤土重量放入組合好的分裂模具中，將壓感放置在土樣上，隨後使用萬能試驗機以靜壓夯實方式壓製，最後兩個半圓模組合而成高 100mm，半 50mm 的圓柱試體。



圖 4.2 壓桿、分裂模內模組合圖

4.2 實驗設備

(1) TDR1500

由德國公司 SYMPULS 製造，如圖 4.3，頻寬為 1.5 GHz，測量時間軸之範圍為-50 ps ~ 20 μ s，最快擷取時距(Sampling time interval)為 10 ps，設計上接口為 USB，可直接與電腦連接進行控制與監測作業。



圖 4.3 TDR1500

(2) RG58同軸線(Radio Guide-58)

為 50 Ω 同軸電纜線，其使用型號為 RG-58 A/U，以細銅線捲繞在一起當中央導線，如圖 4.4，由外至內部結構為包覆體(PVC)、外部導體(軟銅線網)、遮蔽層(鋁箔)、絕緣體(LDPE)、中心導線(軟銅線)。其性能適用溫度可達 90 $^{\circ}$ C，標稱阻抗為 50 Ω ，使用頻率最高可達 1GHz。



圖 4.4 RG58- A/U 同軸線

(3) 真空凡士林

為確保浸水試驗之水源由底部進入，因此使用真空凡士林將可能進入水的地方塗上真空凡士林，又稱矽油脂膏，如圖 4.5。採用道康寧(Dow Corning)，其顏色為白色透明，適用溫度為-40至204°C，可耐酸鹼與水，常用於化學加工、實驗設備、管路系統上做為防漏劑與潤滑劑。



圖 4.5 真空凡士林

4.3 實驗配置、方法

利用 TDR（時域反射法）電磁波進行監測及探查之方法。其原理由脈衝電磁波製造器產生脈衝電磁波進入一同軸電纜，沿著同軸電纜傳播脈衝電磁波到感測器中，並進入待測物體，進行含水量監測。將組合完成的模具並在中間埋設 TDR 感測器，熱探針，以下方浸水的方式進行試驗，其實驗配置如圖 4.6 所示。

使用 TDR 系統進行體積含水量監測，目的為了解緩衝材料之體積含水量歷時變化，並進一步得出分層含水量之歷時體積含水量變化，因此本研究提出分層含水量之計算方法，如圖 4.7 為實際試體尺寸：

藉由 TDR 感測器不同深度(9、10 cm)與固定半徑 r 為 5 cm，分別計算出體積，即為平均體積含水量。而分層含水量係將兩體積之平均體積含水量相減即為如圖 4.7 之 1 cm 之分層含水量。

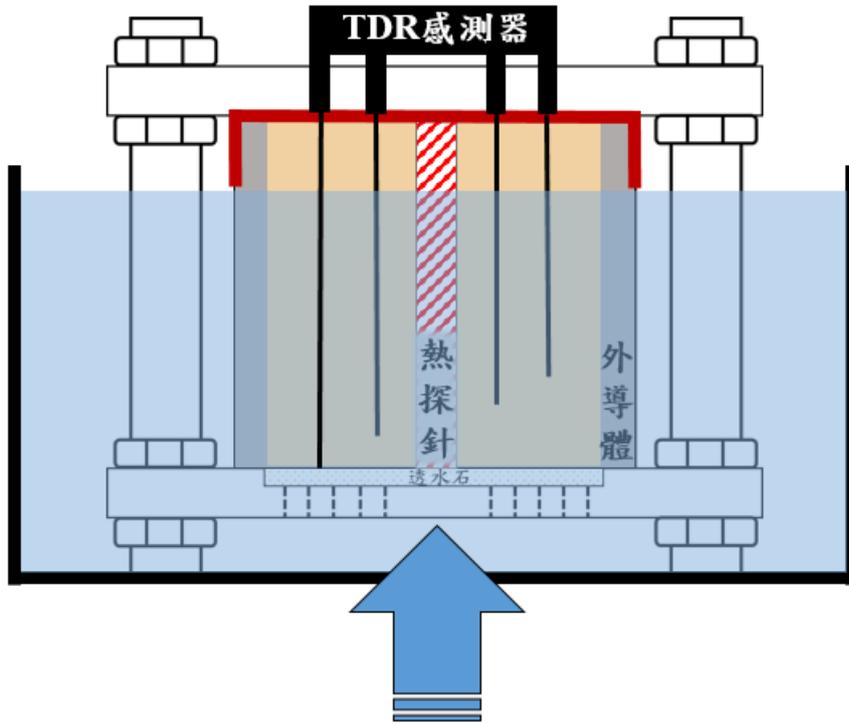


圖 4.6 實驗設計配置圖

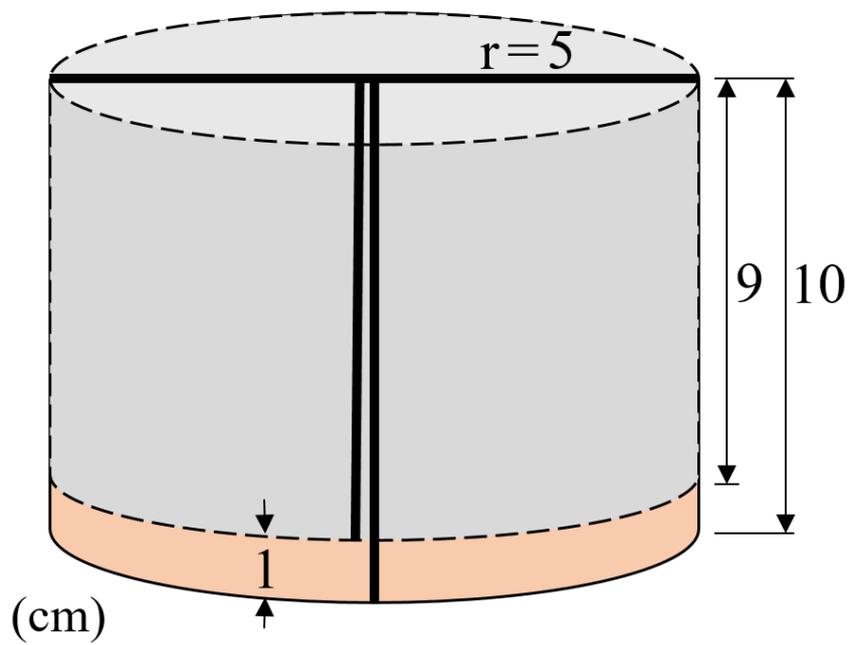
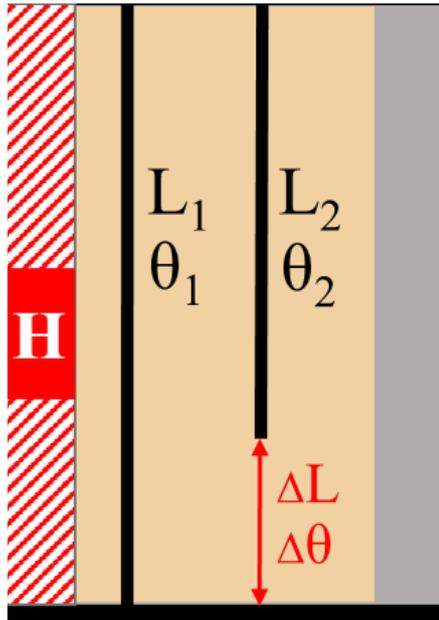


圖 4.7 試體分層含水量計算概念

再者將上述之體積概念簡化，如圖 4.8 所示，扣除共有之半徑 r ，因此可簡化推導為感測器深度與含水量關係。由兩條不同感測器深度 L_1 、 L_2 ，其分別測得各體積下之平均體積含水量 θ_1 、 θ_2 ，目的求得 ΔL 下之 $\Delta\theta$ ，即為分層含水量，而相互關係表示於公式，經由移項後可得 ΔL 下之 $\Delta\theta$ 。



$$L_1\theta_1 = L_2\theta_2 + \Delta L\Delta\theta$$

$$\rightarrow \Delta\theta = \frac{L_1\theta_1 - L_2\theta_2}{\Delta L} \quad (\text{式 4.1})$$

圖 4.8 分層含水量計算

L_1 、 L_2 ：兩不同深度之感測器， $L_1 > L_2$ (m)。

θ_1 、 θ_2 ：由 L_1 、 L_2 求得之體積含水量(%)。

ΔL ： L_1 、 L_2 相互深度差(m)。

$\Delta\theta$ ： ΔL 深度之體積含水量(%)。

因為既有 TDR 感測端導線為眾多細小金屬線匯合而成，由圖 4.9 可以觀察到改良前原感測器量測之 TDR 波型具有多處上下起伏之突波，這些突波對數據的後處理會造成不小的困難，且在分裂模內進行感測器布置時，因金屬絲極易彎折，不易平整並鉛直的進行埋設。

考慮到上述缺點，本研究以 10 cm 之鎢鋼圓棒替代三軸導線之內導體，並以耐高溫之 AB 膠進行同軸線與鎢鋼圓棒之膠結固定，詳細 TDR 感測器改良製作方式如表 4-1 說明，以防止感測器在高溫狀態下與鎢鋼圓棒分離，進行試體內部感測器布置時因為鎢鋼圓棒具有一定的硬度，埋設極為容易。實驗波型數據如圖 4.9 所示，TDR 曲線平滑且穩定，大大降低進行數據後處理的難度。

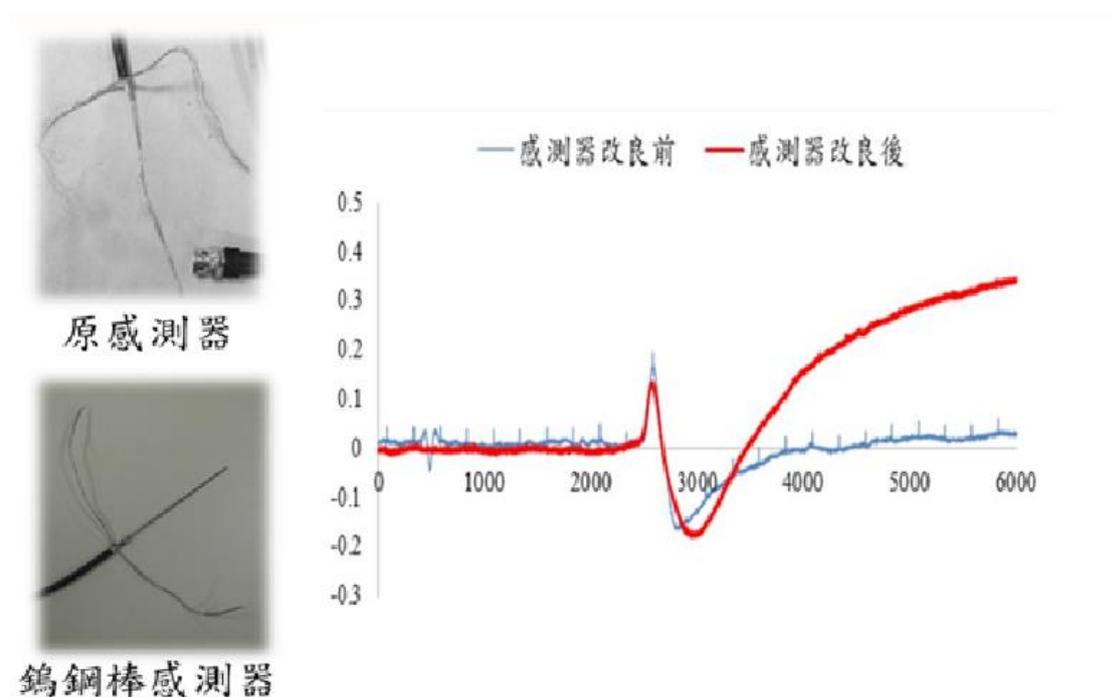
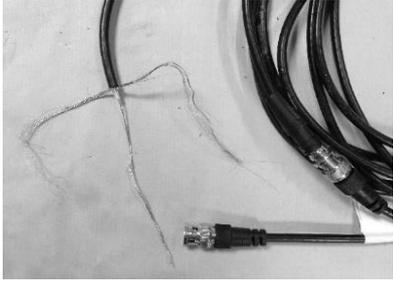
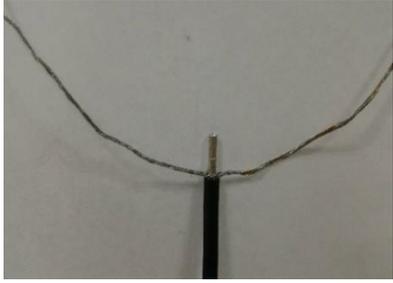
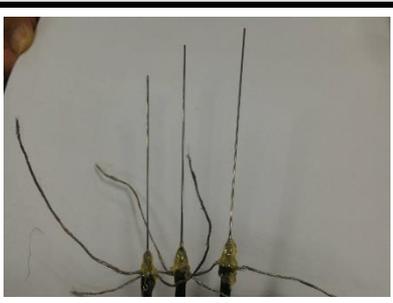


圖 4.9 感測器改良

表 4-1 TDR 感測器改良製作過程

<p>1.原三軸感測器。</p>	<p>2.剪去中間端內導體，預留約 0.5 cm 長度。</p>
	
<p>3.將剩餘 0.5 cm 內導體與直徑 1.1 mm 鎢鋼圓棒以細鐵絲纏繞。</p>	<p>4.硬化劑 A 膠及樹脂 B 膠以 1:2 比例調配成 AB 膠。</p>
	
<p>5.等待 AB 膠乾燥至一定稠度時塗抹於鎢鋼棒與內導體交接處。</p>	<p>6.等待 AB 膠完全乾燥。</p>
	
<p>7.以切割機根據實驗需要進行感測器裁切，得到所需長度之感測器。</p>	<p>8.重複步驟 1 至 7 製作數條鎢鋼棒感測器。</p>
	

另外本研究在 14%與 24%體積含水量試體內埋設 TDR 鎢鋼棒感測器後置於烘箱內以 90°C 進行加熱，擷取並記錄室溫 25°C 至 80°C 之 TDR 波型，分別如圖 4.10 與圖 4.11 所示，實驗發現在越高含水量下，隨著溫度升高，膨潤土因為導電度快速提升，使 TDR 脈衝電磁波在土中反射所得到之波型穩態值逐漸趨緩，甚至在 34%體積含水量下，波型完全沒有起伏，如圖 4.12，此狀態讓數據在後處理上十分困難。

為了降低溫度對鎢鋼棒感測器的影響，避免 TDR 波型受導電度影響而無反射訊號，本研究於鎢鋼棒表層使用絕緣材料進行鎢鋼棒 Coating，如圖 4.13 所示，在降低鎢鋼棒對環境敏感度的同時也能維持 TDR 波型，有利於數據後續後處理的進行。

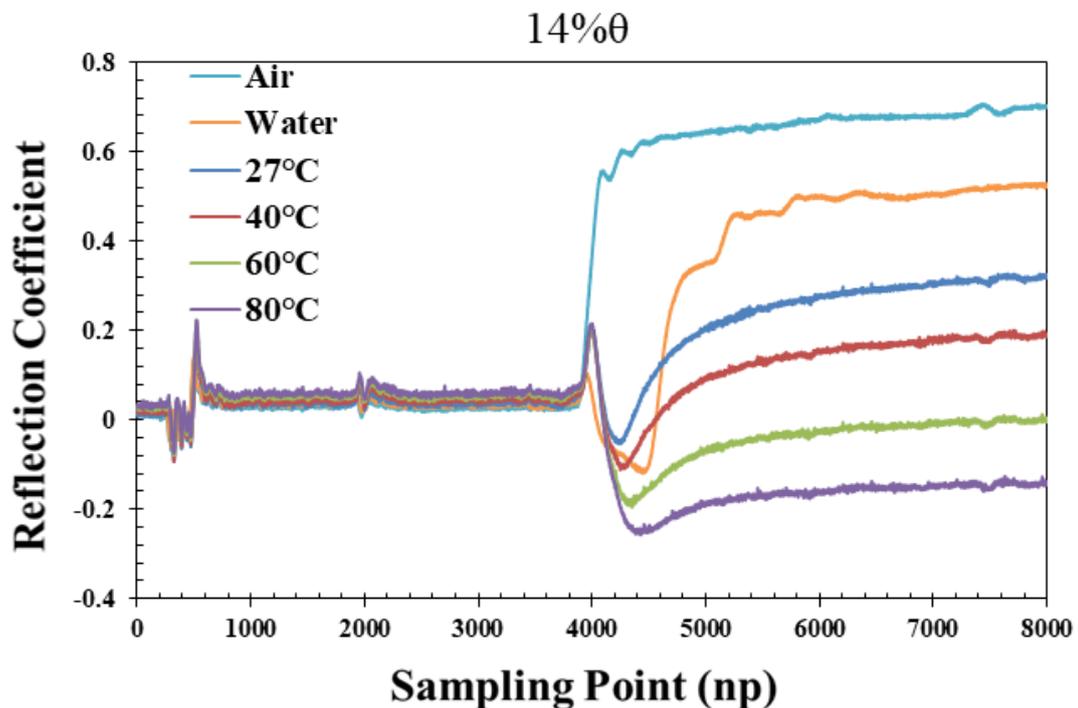


圖 4.10 不同溫度之 14%含水量 TDR 波型頻散情形

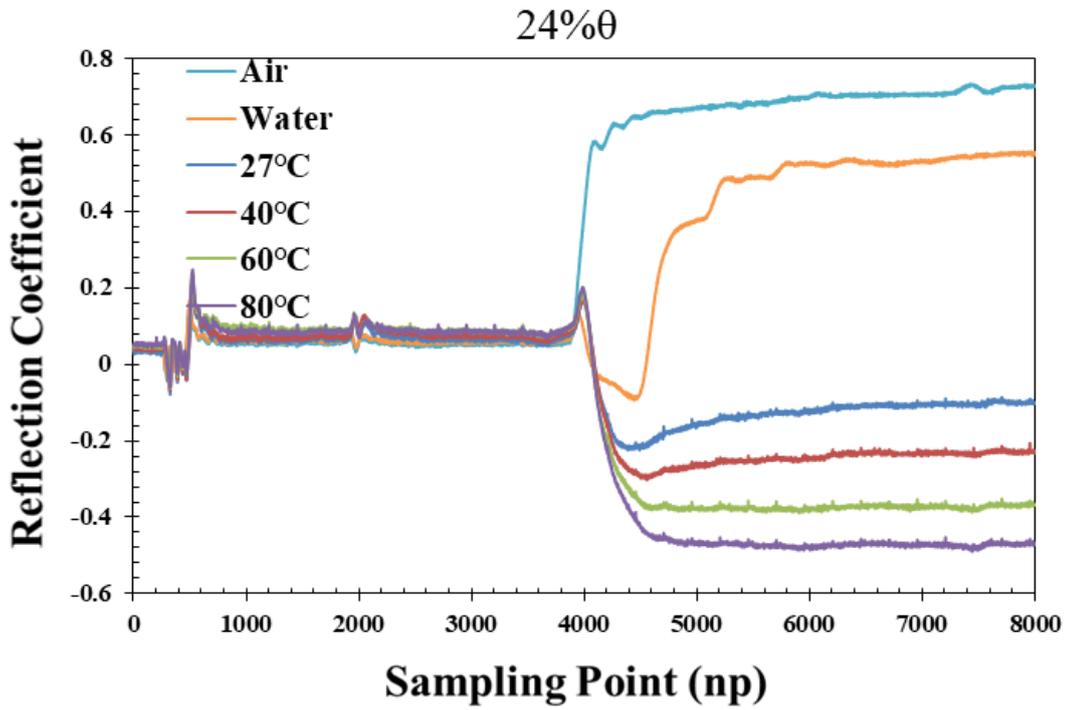


圖 4.11 不同溫度之 24% 體積含水量 TDR 波型頻散情形

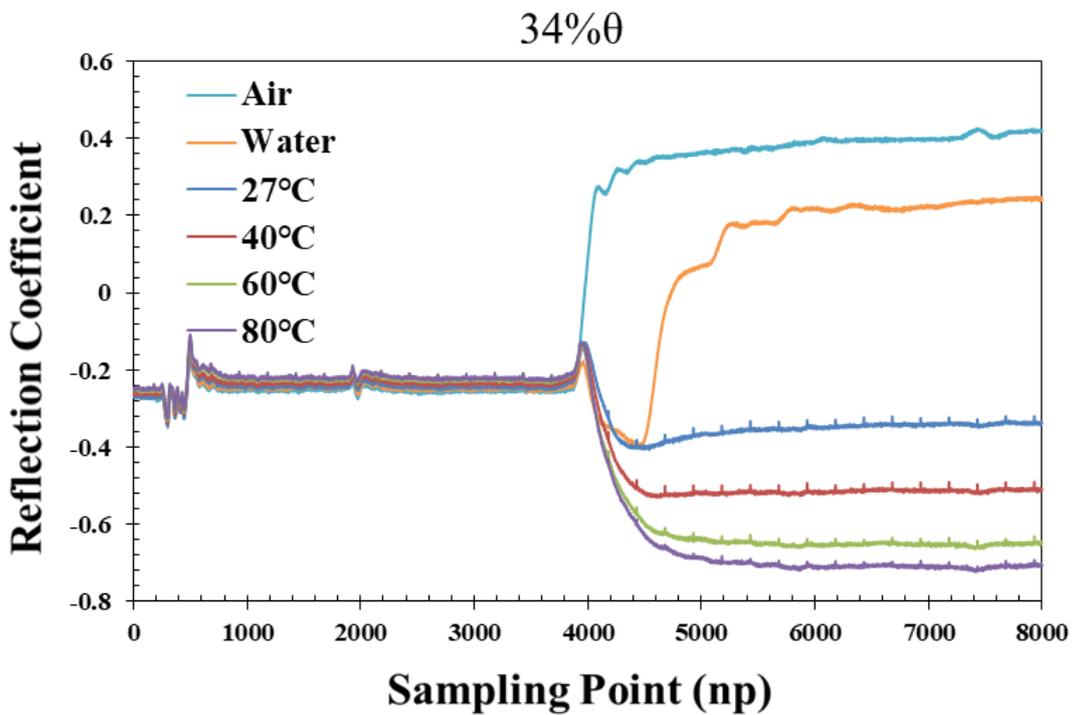
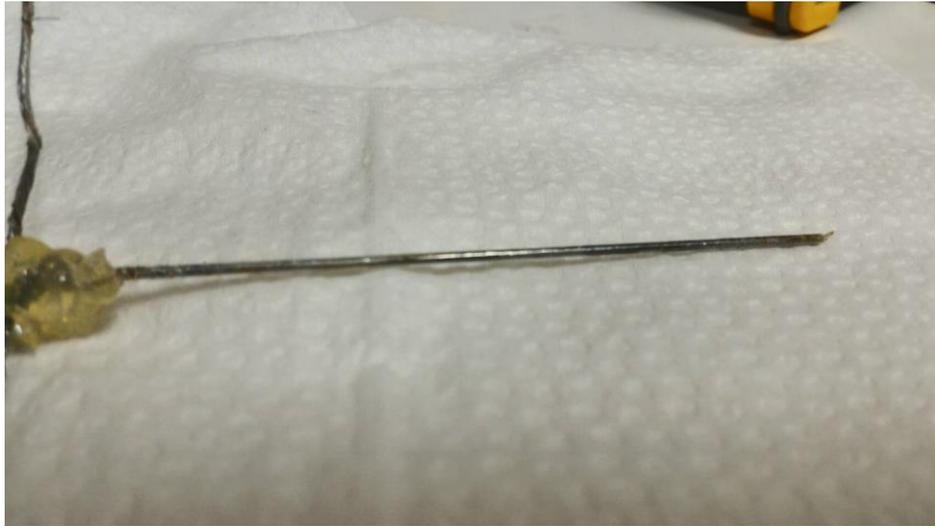


圖 4.12 不同溫度之 34% 體積含水量 TDR 波型頻散情形



(a)



(b)

圖 4.13 (a)保鮮膜 Coating (b)熱縮管 Coating

4.4 試驗結果

(一) 含水量-視介電常數-溫度三相圖建立

本研究以體積含水量之關係曲線作為基礎，藉由控制膨潤土之含水量，以 14%、24%、34% 三組體積含水量進行兩種絕緣感測器（保鮮膜、熱縮膜）之視介電常數-溫度關係曲線量測，如圖 4.14、圖 4.16，利用 matlab 程式繪製出含水量-視介電常數-溫度三相圖，如圖 4.15、圖 4.17。

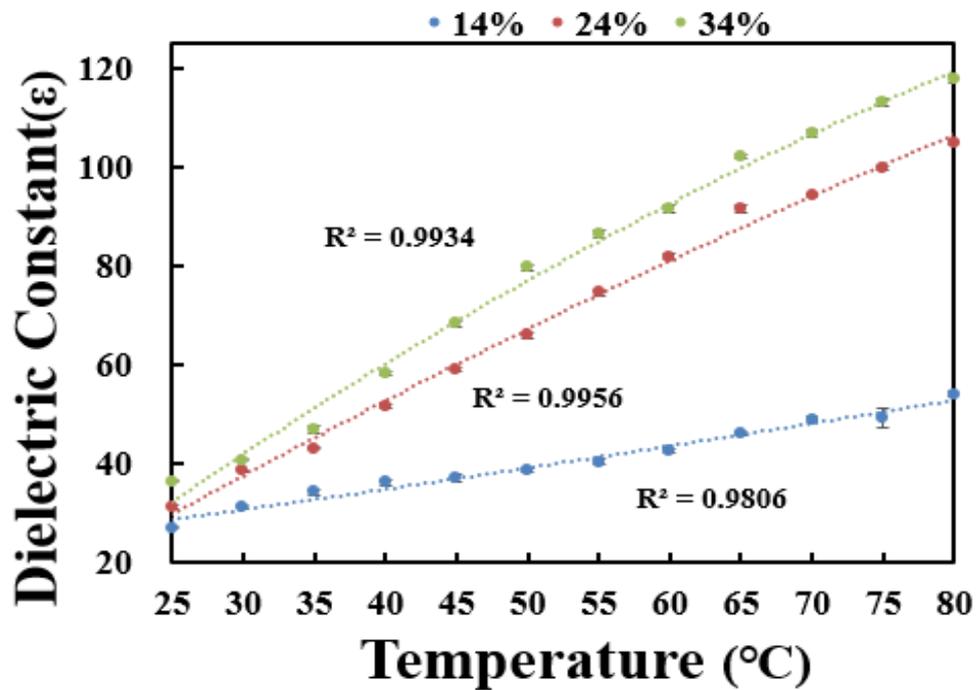


圖 4.14 保鮮膜絕緣感測器視介電常數-溫度關係曲線

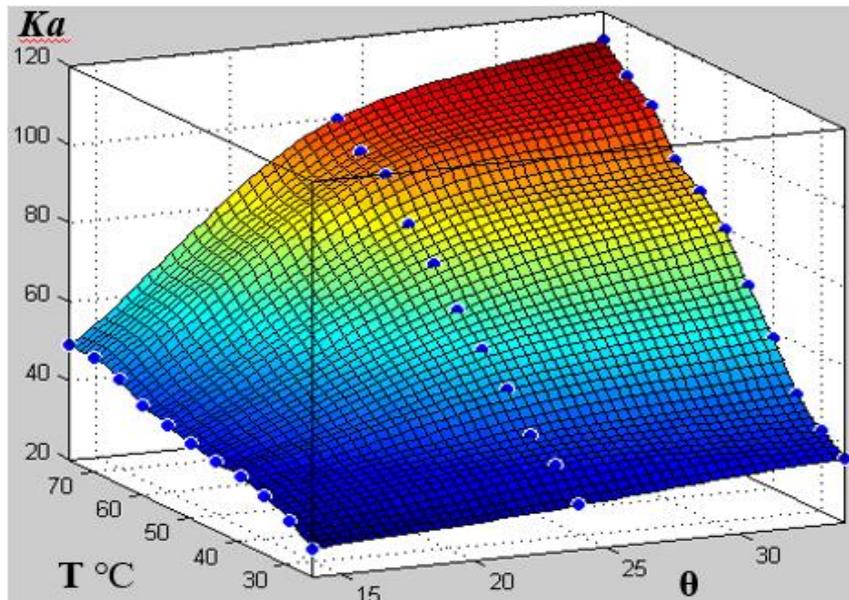


圖 4.15 保鮮絕緣膜感測器測得膨潤土之含水量-視介電常數-溫度三相圖

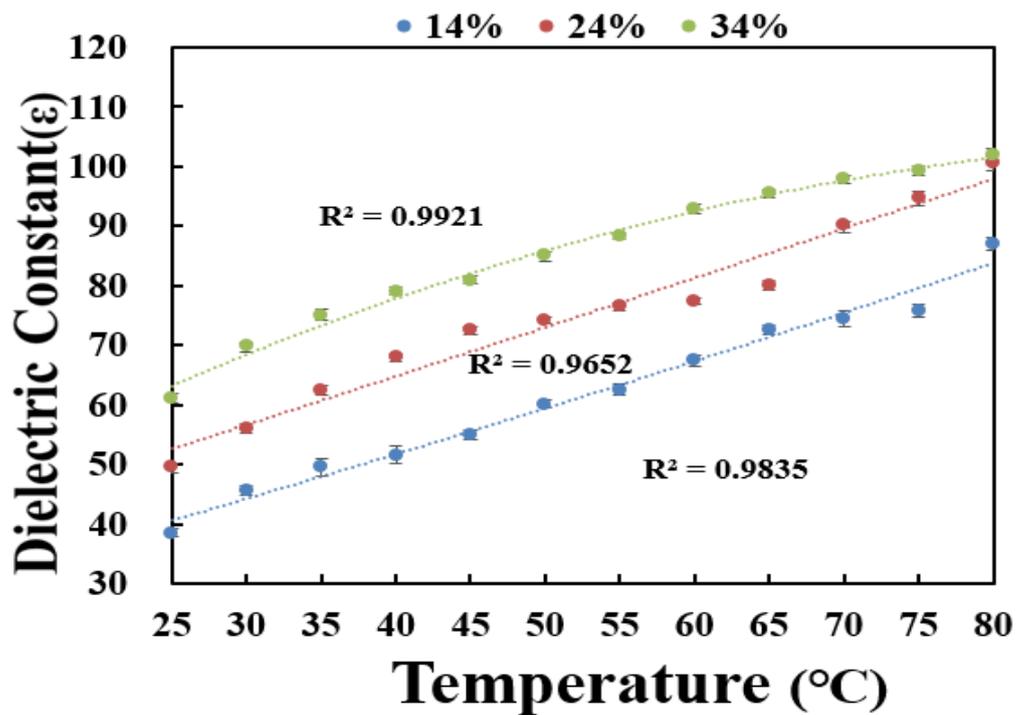


圖 4.16 熱縮管絕緣感測器視介電常數-溫度關係曲線

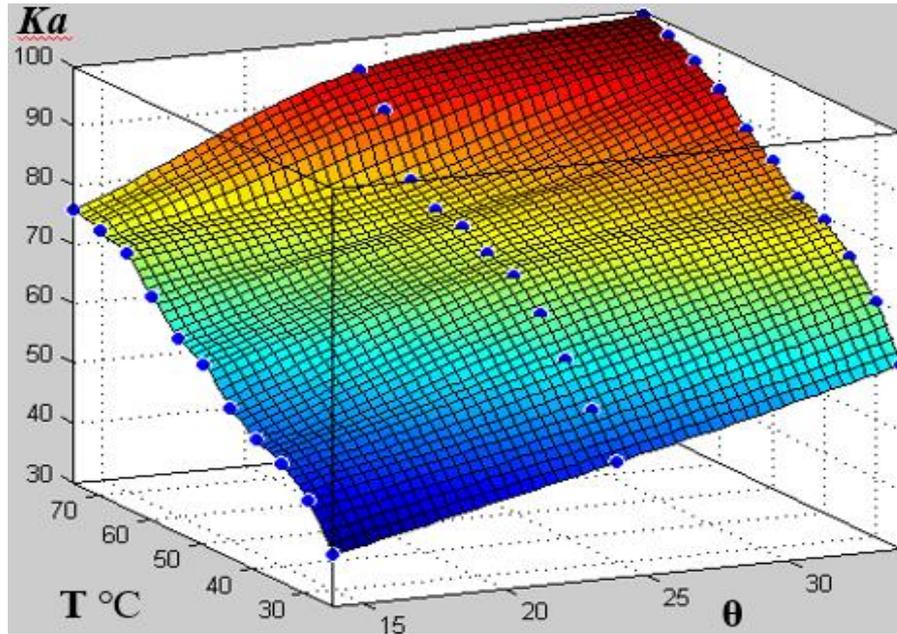


圖 4.17 熱縮管絕緣感測器測得膨潤土之含水量-視介電常數-溫度三相圖

透過保鮮膜感測器及熱縮管感測器於 14 %、24 %、34 % 不同體積含水量下建立之視介電常數-溫度關係曲線相比，保鮮膜絕緣感測器之關係曲線較為接近使用未改良前感測器所建立之 SPV200 膨潤土視介電常數-溫度關係曲線，如圖 4.18，而熱縮管絕緣感測器雖然 K_a 變化幅度相對保鮮膜絕緣感測器來說較小，但因為整體量測值偏高，比較原感測器、保鮮膜感測器、熱縮套管感測器建立之關係曲線，如圖 4.18，本研究選擇與改良前感測器建立之 SPV200 膨潤土視介電常數-溫度關係曲線較接近之保鮮膜感測器進行後續緩衝材料加溫及室溫分層含水量歷時監測。

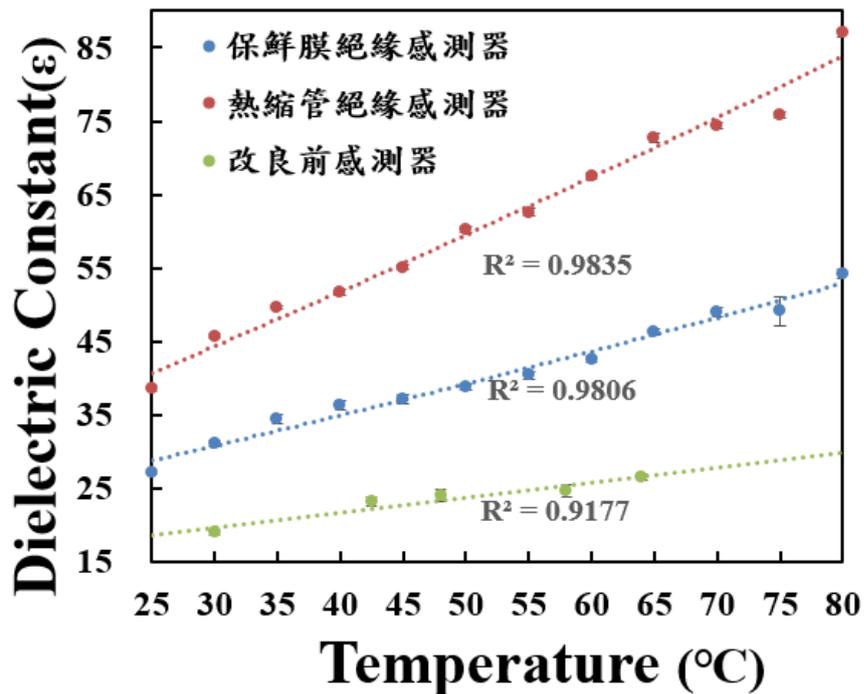


圖 4.18 不同感測器建立之 SPV200 膨潤土視介電常數-溫度關係曲線

(二) 緩衝材料 T-H 耦合小型試驗

膨潤土試體於室溫下進行定溫浸水試驗，使用 TDR 系統進行體積含水量即時監測，如圖 4.19 於試體內埋設分層解析度為 1 cm 之 3 根保鮮膜 Coating 感測器，並以外束環束制外模，再將整組試體置於固定模具設備基座上，上蓋後旋緊上蓋螺旋加以束制，最後將試驗模具置於水槽中注水後開始實驗，如圖 4.20，使用多工器從實驗開始後每 2 小時自動記錄 TDR 波型至實驗結束，並輔以 matlab 程式進行波形抓點，計算視介電常數 K_a ，再對照不同溫度下之膨潤土視介電常數-溫度關係圖（圖 4.15），換算出對應之體積含水量後，搭配分層體積含水量公式進行解析度 1 cm 之分層含水量計算，實驗結束後將試體拆卸以觀察試體浸水狀況，並以秤重方式計算試體重量含水量，以驗證所測得之歷時分層含水量。

10 , 9 , 8cm

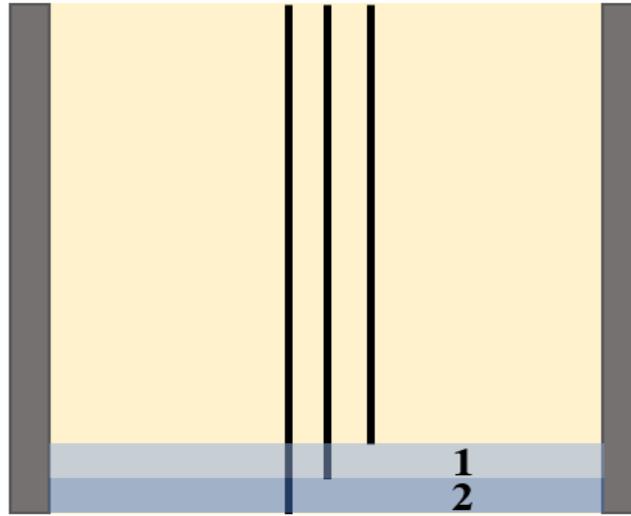


圖 4.19TDR 感測器配置圖



圖 4.20 試體浸水試驗

(1) 25 度溫度系統浸水試驗

試體於室溫 25 °C 下浸水 120 hr，利用 TDR 系統進行歷時體積含水量計算，如圖 4.21，並搭配分層含水量計算公式計算其分層歷時體積含水量，如圖 4.22 待試驗完成後將試體拆卸，觀察浸水 120 hr 後試體剖面變化如圖 4.23，並以刮勺平均刮取下層 1 cm、2 cm 之膨潤土試體，置於 90 °C 烘箱內烘乾 24 hr 後進行試體稱重，計算試體重量含水量，重量含水量計算結果如表 4-2，將分層重量含水量乘上試體當層乾密度換算分層試體體積含水量，以驗證 TDR 系統之體積含水量監測結果。

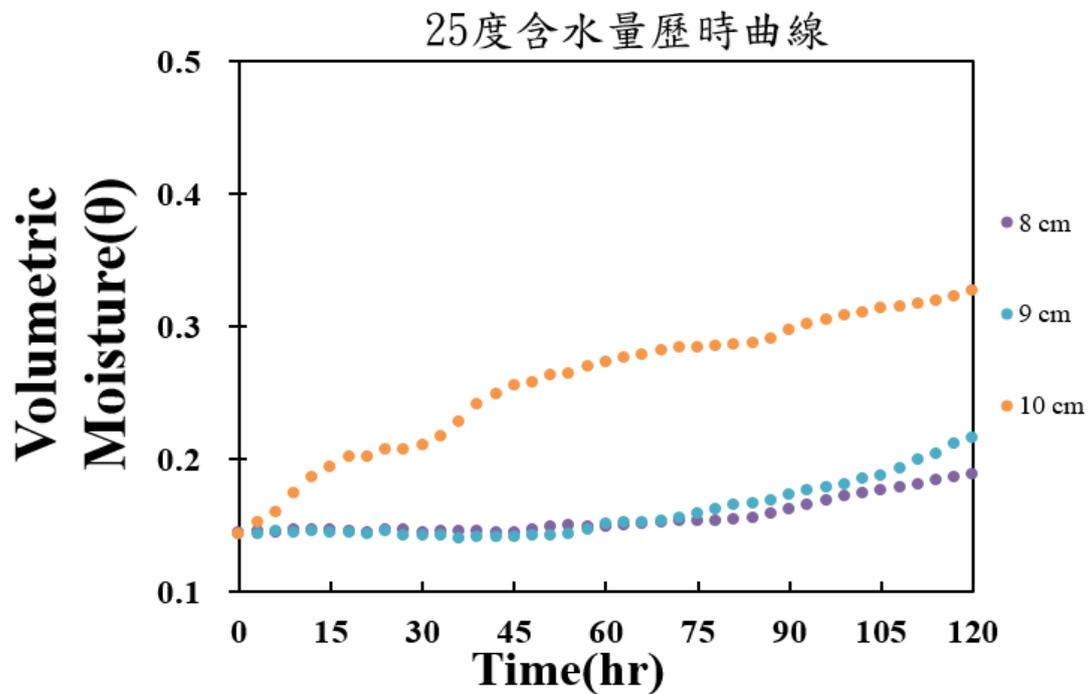


圖 4.21 25 度體積含水量歷時曲線

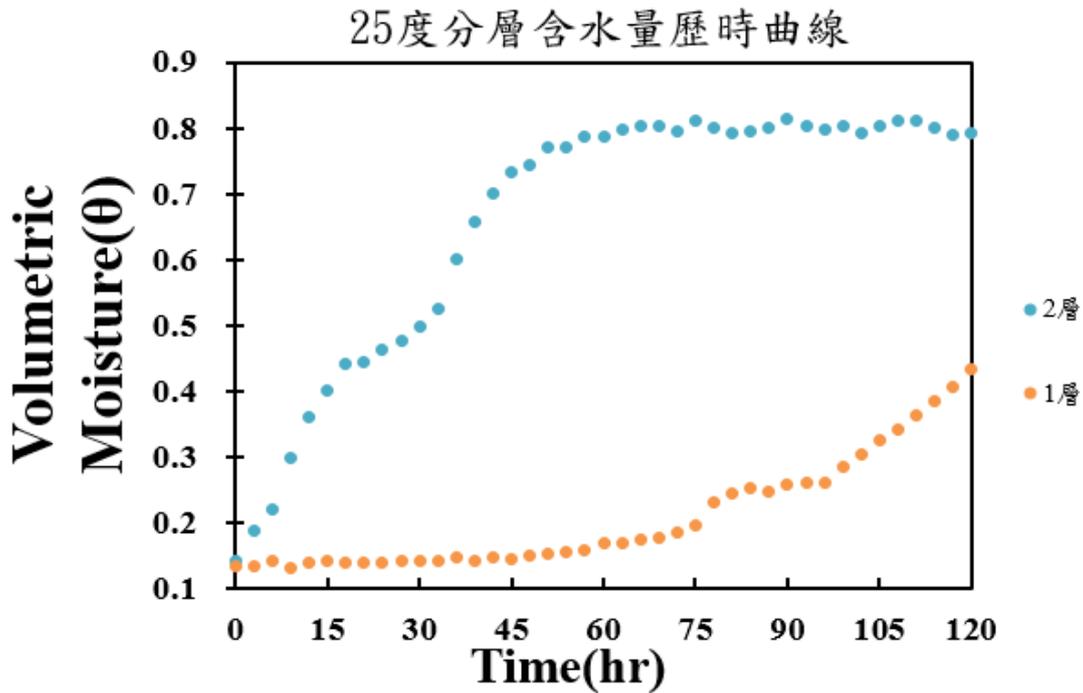


圖 4.22 25 度分層體積含水量歷時曲線

由 25 度歷時體積含水量曲線觀察到 10 cm 感測器之體積含水量變化範圍為 14%~32.74%，9 cm 感測器之體積含水量變化範圍為 14%~21.65%，8 cm 感測器體積含水量變化範圍為 14%~18.83%，顯示浸水 120 hr 後，水分已被膨潤土吸收並入侵至試體 1.5 cm 高處，如圖 4.23。

由 25 度分層體積含水量歷時曲線則觀察到浸水 120 hr 之 1 層體積含水量為 43.5%，2 層體積含水量為 79.1%，秤重法測得之 1 層體平均積含水量為 43%，秤重法測得之 2 層體平均積含水量為 77.6%，與實驗結果差距不大，如表 4-2 25 度系統分層重量含水量量測結果(%)其中 2 層體積含水量遠高於飽和膨潤土理論界限值 47%，這是因為膨潤土擁有極強之回脹潛能，下層高飽和度膨潤土於定體積環境中膨脹並向上擠壓上層低飽和度膨潤土，產生位移導致乾密度上升，孔隙體積與土壤顆粒體積產生改變，對飽和度產生影響，使得分層體積含水量大於飽和膨潤土理論界限值 47%。

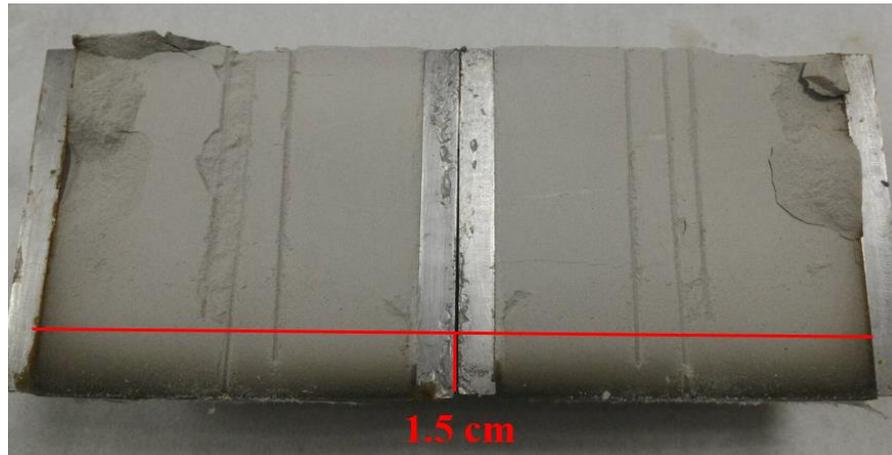


圖 4.23 25 度系統浸水 120 hr 之試體剖面

表 4-2 25 度系統分層重量含水量量測結果(%)

	2 層外圈	2 層內圈	1 層外圈	1 層內圈
1	55.2	55.5	30.6	30.8
2	55.0	55.4	30.7	31.0
3	55.3	56.0	30.4	30.8
AVG	55.2	55.6	30.6	30.9
層平均	55.4		30.7	

(2) 40 度溫度系統浸水試驗

試體於 40 °C 恆溫水槽浸水 120 hr 後進行拆卸，同樣平均刮取 1、2 層之膨潤土試體以 90 °C 烘箱烘乾 24 hr 後進行分層體積含水量計算以驗證實驗結果，如表 4.3，歷時體積含水量如圖 4.24 所示，搭配分層含水量計算公式換算之分層歷時體積含水量如圖 4.25，浸水 120 hr 後試體剖面變化如圖 4.21，水分被膨潤土吸收並入侵至試體約 1.5 cm 高處。

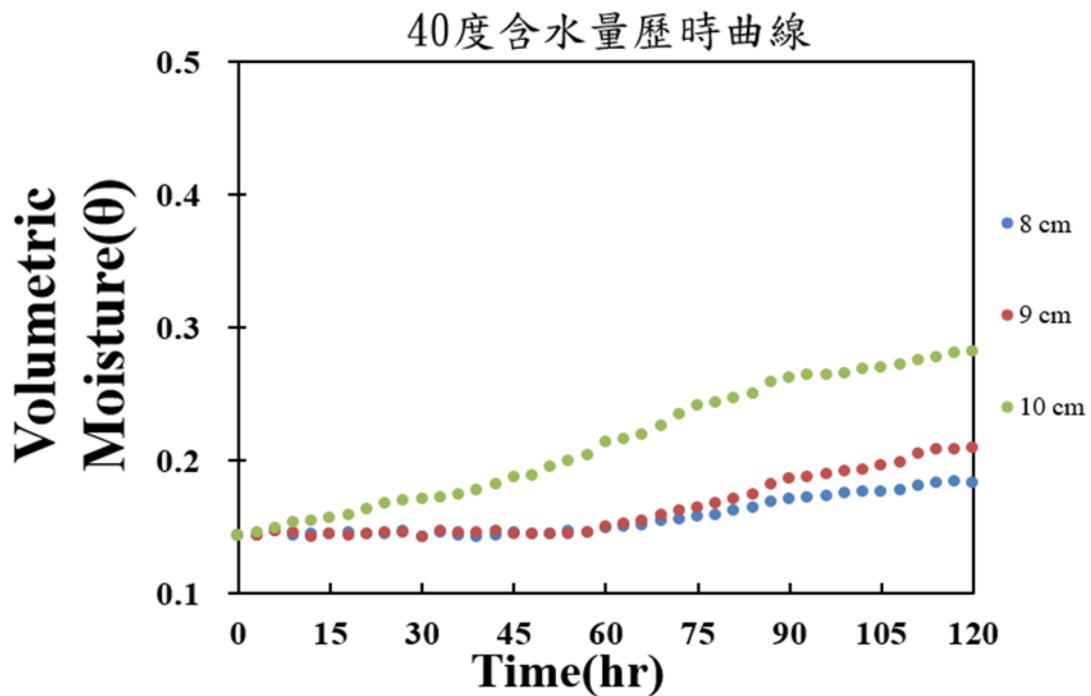


圖 4.24 40 度體積含水量歷時曲線

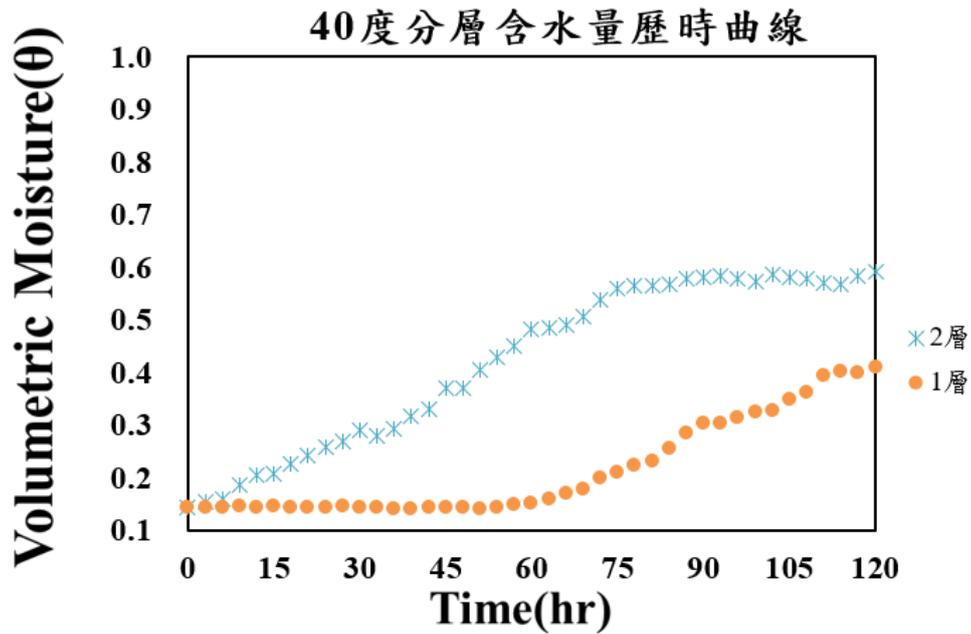


圖 4.25 40 度分層體積含水量歷時曲線

由 40 度含水量歷時曲線觀察到 10 cm 感測器之體積含水量變化範圍為 14 %~28.26 %，9 cm 感測器之體積含水量變化範圍為 14 %~20.9 %，8 cm 感測器體積含水量變化範圍為 14 %~18.31 %，整體體積含水量變化低於 25 度系統，從 40 度分層體積含水量歷時曲線得到浸水 120 hr 之 1 層體積含水量為 40.9 %，2 層體積含水量為 59.1 %，秤重法測得之 1 層體平均積含水量為 40.9 %，秤重法測得之 2 層體平均積含水量為 59.2 %，也與實驗結果相符，如表 4-。

其 2 層體積含水量 58.88 % 同樣大於飽和膨潤土理論界限值 47 %，原因同樣是因為膨潤土之回脹導致膨潤土乾密度發生改變，使得孔隙體積與土壤顆粒體積改變，影響飽和度，但因為膨潤土之回脹能力隨著溫度升高而降低，預期位移量增加幅度低於 25 度系統，故在 40 度系統下其分層體積含水量也同樣低於 25 度系統之分層體積含水量。

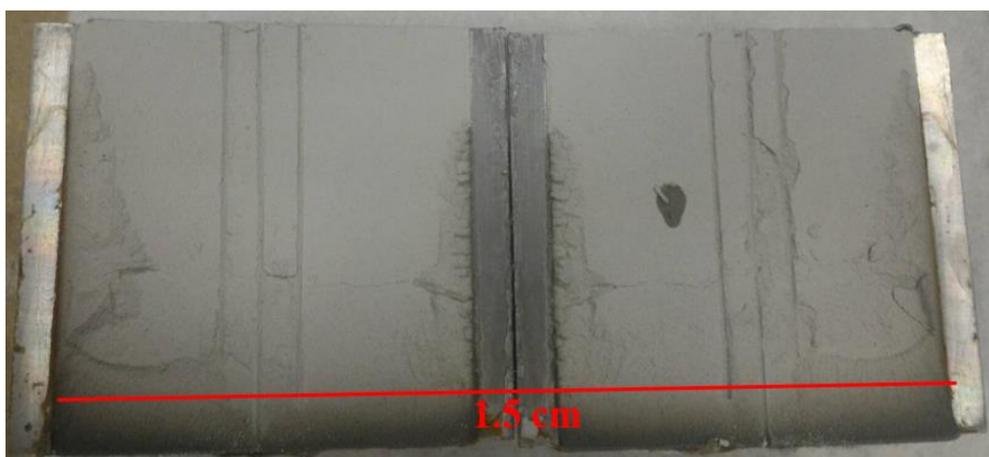


圖 4.26 40 度系統浸水 120 hr 之試體剖面

表 4-3 40 度系統分層重量含水量量測結果(%)

	2 層外圈	2 層內圈	1 層外圈	1 層內圈
1	42.1	43.0	28.9	29.7
2	41.0	42.7	29.1	29.6
3	42.0	43.0	28.5	29.5
AVG	41.7	42.9	28.8	29.6
層平均	42.3		29.2	

(3) 60 度溫度系統浸水試驗

試體於 60 °C 恆溫水槽浸水 228 hr 後進行拆卸，平均刮取 1、2 層之膨潤土試體以 90 °C 烘箱烘乾 24 hr 後進行分層體積含水量計算以驗證實驗結果，如表 4-4 60 度系統分層重量含水量量測結果(%)所示，歷時體積體積含水量如圖 4.27 所示，搭配分層含水量計算公式換算之分層歷時體積含水量如圖 4.28，浸水 228 hr 後試體剖面變化如圖 4.29，在試驗浸水 228 hr 後，水分被膨潤土吸收並入侵至試體約 1 cm 高處。

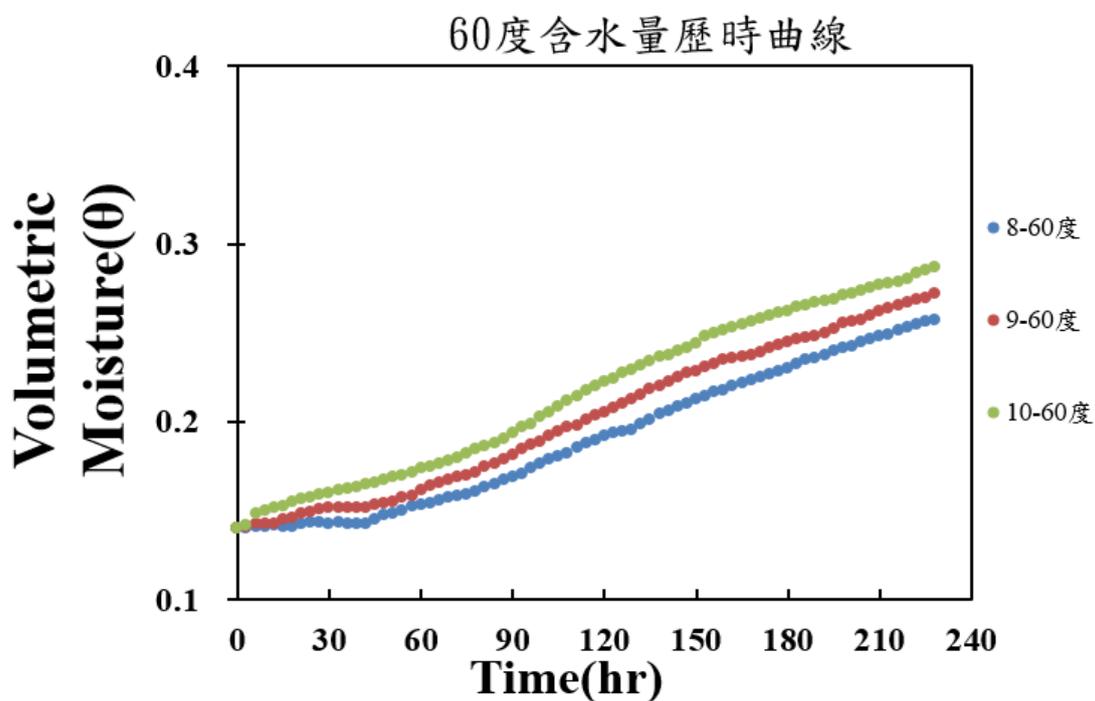


圖 4.27 60 度體積含水量歷時曲線

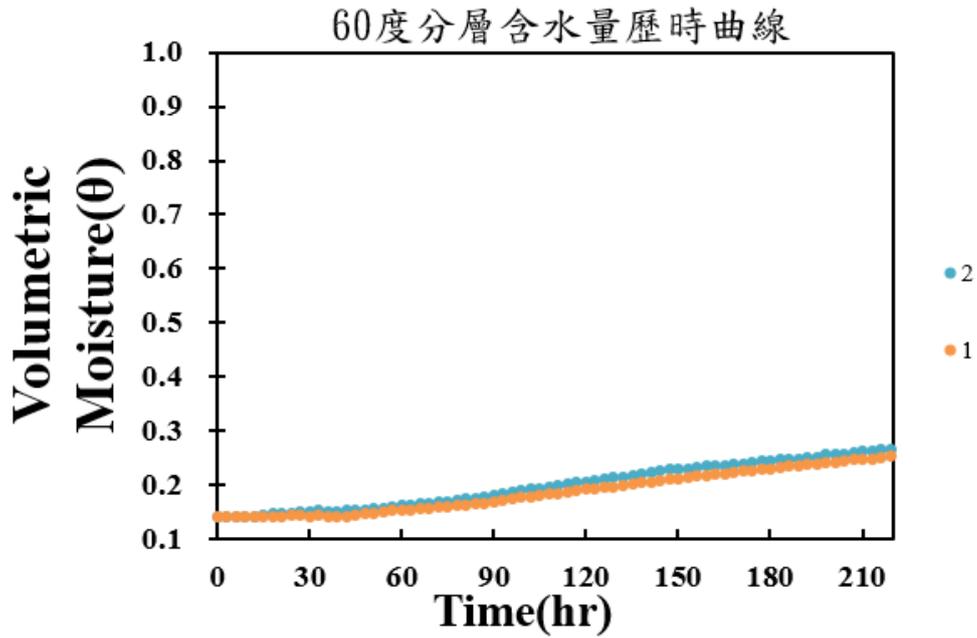


圖 4.28 60 度分層體積含水量歷時曲線



圖 4.29 60 度系統浸水 240 hr 之試體剖面

表 4-4 60 度系統分層重量含水量量測結果(%)

	2 層外圈	2 層內圈	1 層外圈	1 層內圈
1	26.6	26.9	22.6	24.7
2	26.7	27.6	22.5	24.4
3	26.5	27.6	22.6	23.7
AVG	26.6	27.4	22.6	24.4
層平均	27		23.5	

(4) 緩衝材料試體浸水模擬分析

本研究為驗證緩衝材料分層含水量之監測結果，初步使用有限元素分析程式 ABAQUS 進行浸水模擬分析，假設試體體積固定，上下左右四邊皆為束制情形，如圖 4.30，在垂直向及橫向分別撒 50 點及 25 點並繪製矩形網格模型，以模擬膨潤土吸水後試體內部由底部 0 cm 至頂部 10 cm 之試體細微膨脹位移及飽和度變化情形，試體初始孔隙比 0.878，初始飽和度 0.048，初始試體溫度 25 °C，分別以 25 °C、40 °C、60 °C 三個不同系統由試體下方進水，所使用之試驗參數如表 4-所述。

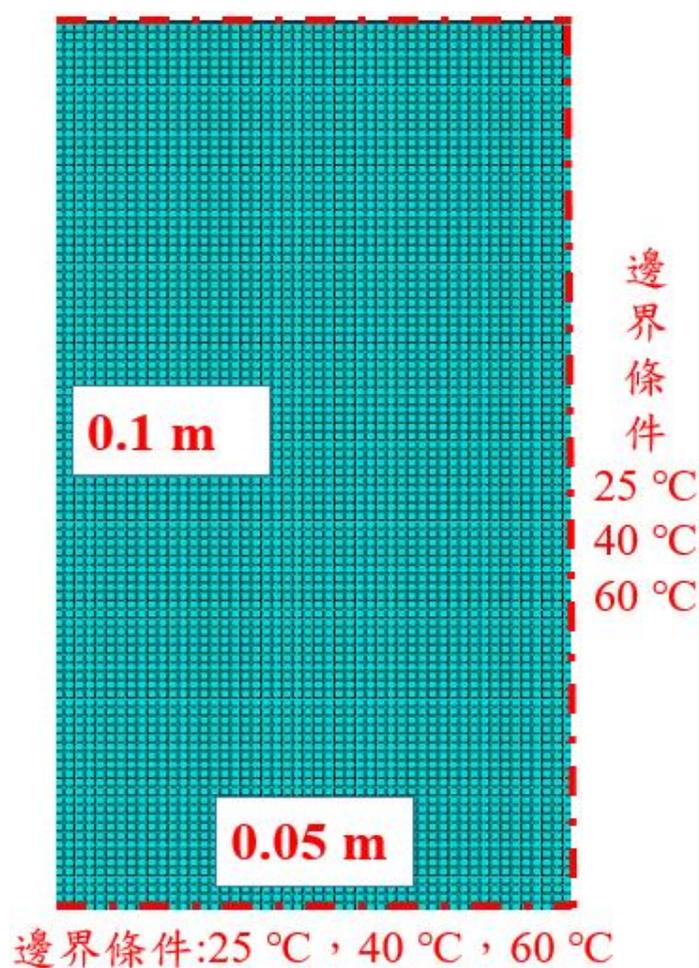


圖 4.30 軸對稱模型邊界條件設定

表 4-5 水力模型模擬參數

水體積模數	$K_w = 2.1 \times 10^6 \text{ kPa}$
土壤顆粒體積模數	$K_g = 2.1 \times 10^8 \text{ kPa}$
土壤之楊氏模數	$E = 3.0 \times 10^4 \text{ kPa}$
25 °C 初始孔隙壓力	-81400 kPa
40 °C 初始孔隙壓力	-74540 kPa
60 °C 初始孔隙壓力	-61400 kPa
土壤顆粒熱膨脹係數	$\alpha_g = 0 \text{ (1/°C)}$
水之熱膨脹係數	$\alpha_w = 3.0 \times 10^{-4} \text{ (1/°C)}$
波生比	0.4
土壤初始飽和度	0.298
土壤初始孔隙比	0.8667
乾密度	1400 kg/m ³
25 °C 回脹壓力	1250 kPa
40 °C 回脹壓力	1045 kPa
60 °C 回脹壓力	937.5 kPa

圖 4.31 依序為有限元素模擬三種溫度系統浸水 120 hr 之試體飽和度，試體在浸水 5 天後水分入侵至試體約 0.03 m 處，試體飽和度發生改變，飽和度由高至低依序為 25 °C >40 °C >60 °C，圖 4.31 為有限元素模擬 3 種溫度系統浸水 120 hr 後，由 0~0.1 m 之飽和度變化，從試體底部 0 m 開始至 0.03 m 處飽和度因由下層試體位移量增大導致膨潤土孔隙體積增加量減小，0.993 遞減為 0.376，最後在 0.03 m 後孔隙體積增加量隨高度提高而減少，故飽和度最終趨於定值 0.34 不再變動，圖 4.32 至圖 4.34 則為各溫度系統之體積含水量歷時變化。

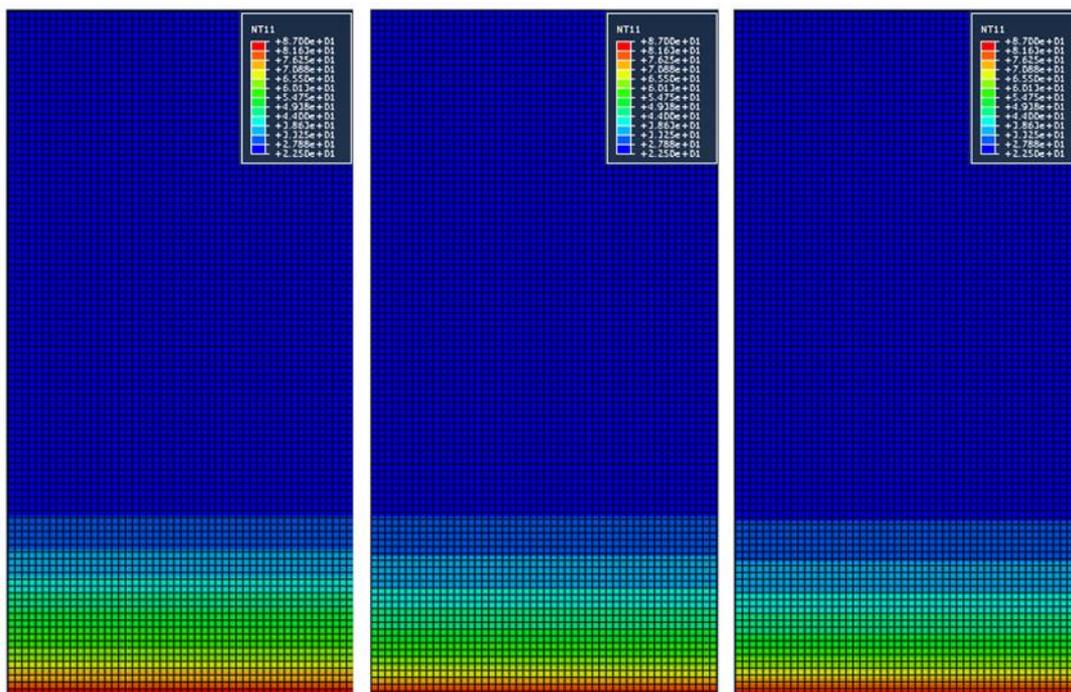


圖 4.31 25 °C、40 °C、60 °C 系統浸水 120 hr 之飽和度

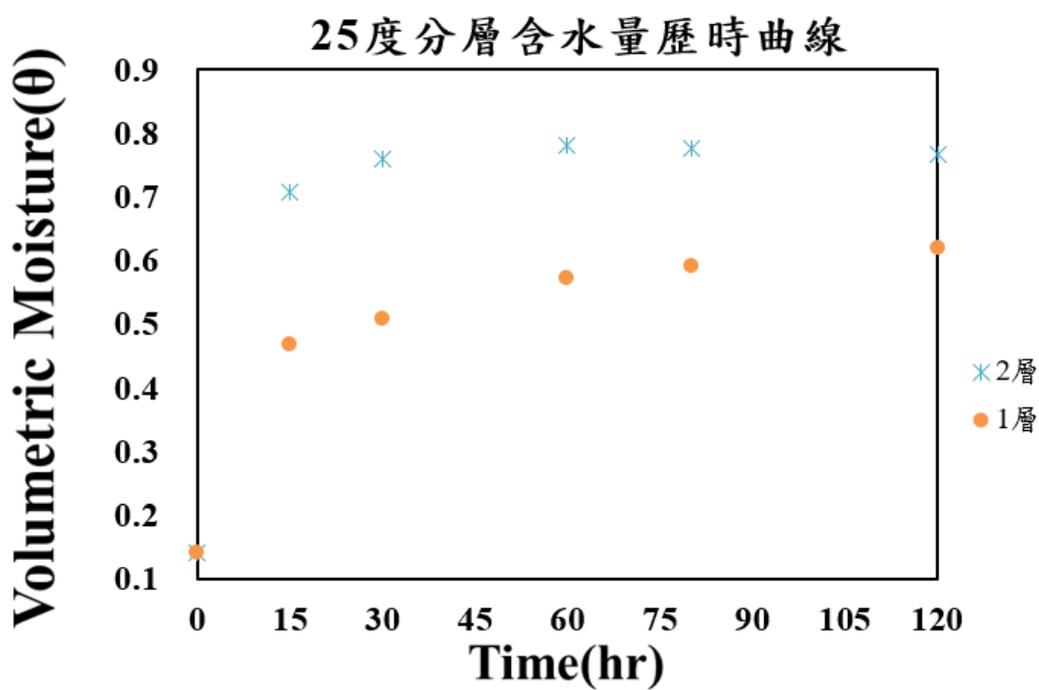


圖 4.32 模擬 25 度溫度系統浸水 120 hr 之體積含水量歷時變化

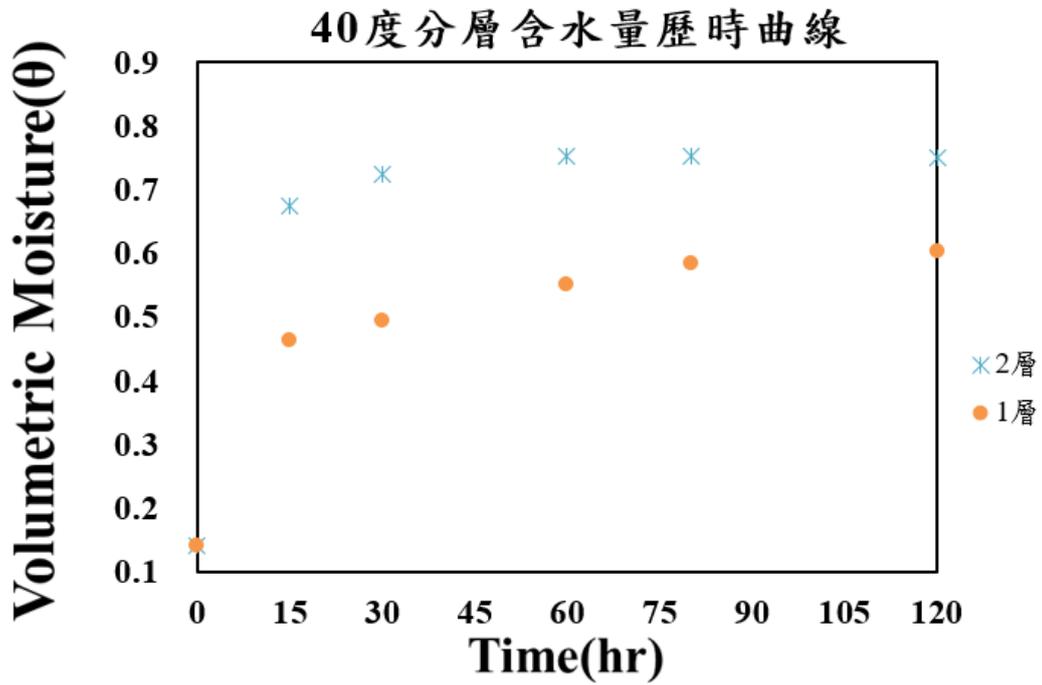


圖 4.33 模擬 40 度溫度系統浸水 120 hr 之體積含水量歷時變化

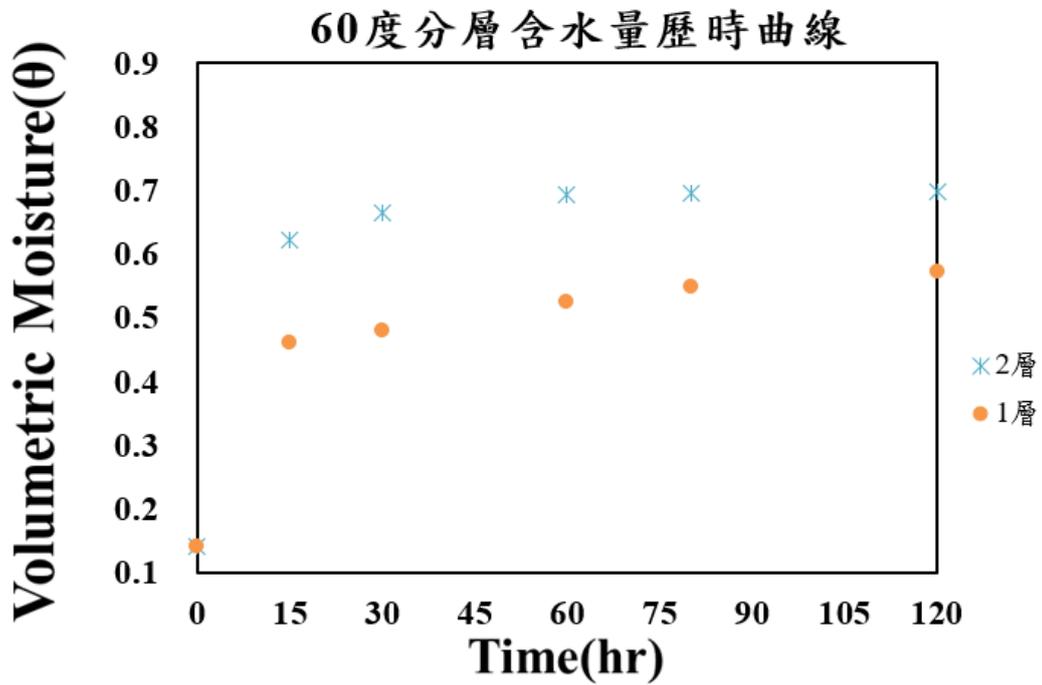


圖 4.34 模擬 60 度溫度系統浸水 120 hr 之體積含水量歷時變化

圖 4.35 為有限元素模擬 3 種溫度系統浸水 120 hr 後，由 0~0.1 m 之位移變化，從試體底部 0 m 開始至 0.03 m 處位移量受到膨潤土吸水回脹影響，由 0.00137 m 遞增為 0.00423 m，0.03 m 後至 0.1 m 因為遠離膨潤土膨脹量最大處，所以位移量漸減至最終為 0，圖 4.36 至圖 4.38 則為各度溫度系統之歷時位移量變化。

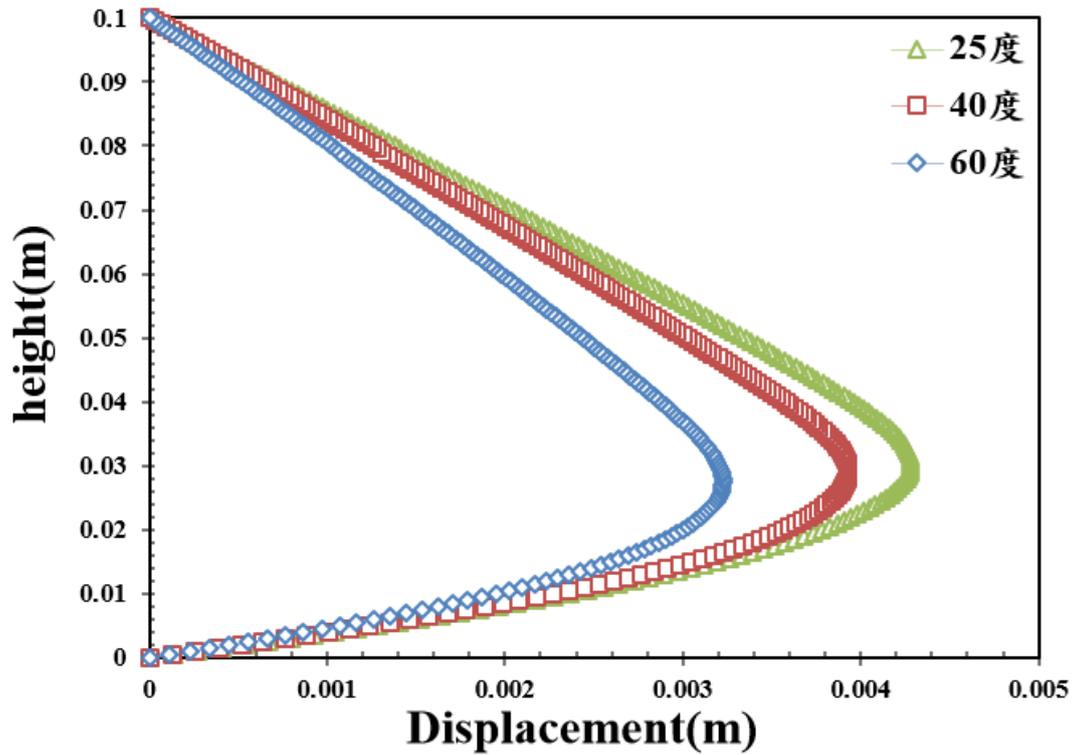


圖 4.35 25 °C、40 °C、60 °C 系統 0~0.1 m 之相對位移變化

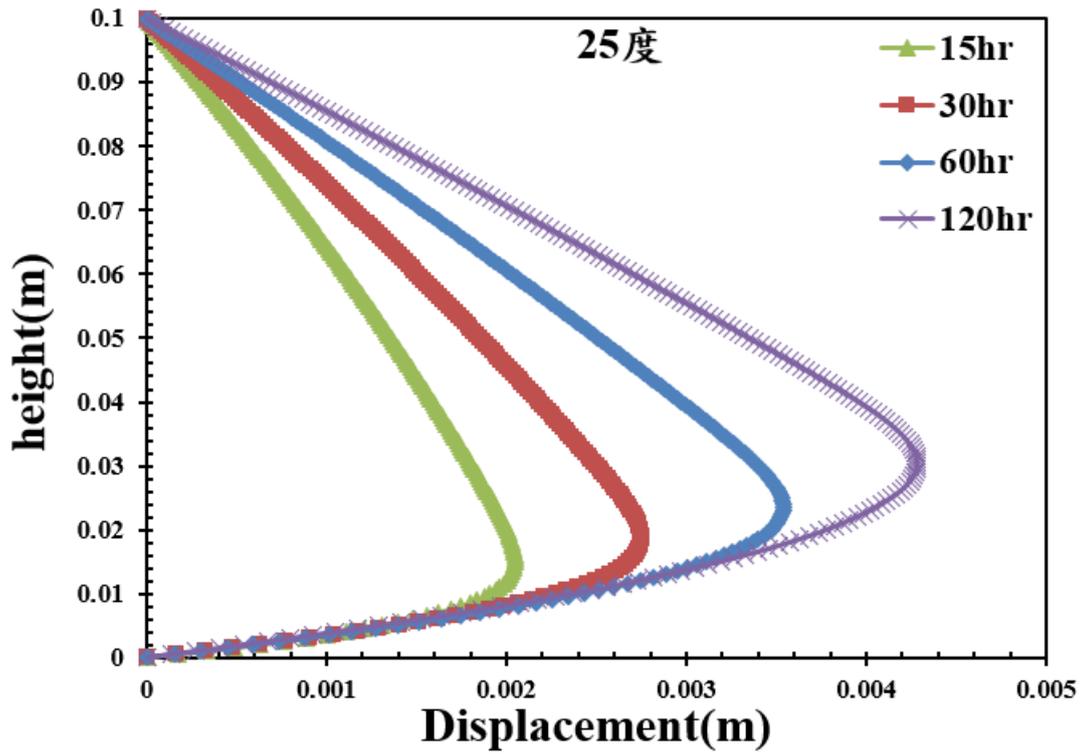


圖 4.36 模擬 25 度溫度系統之位移量歷時變化

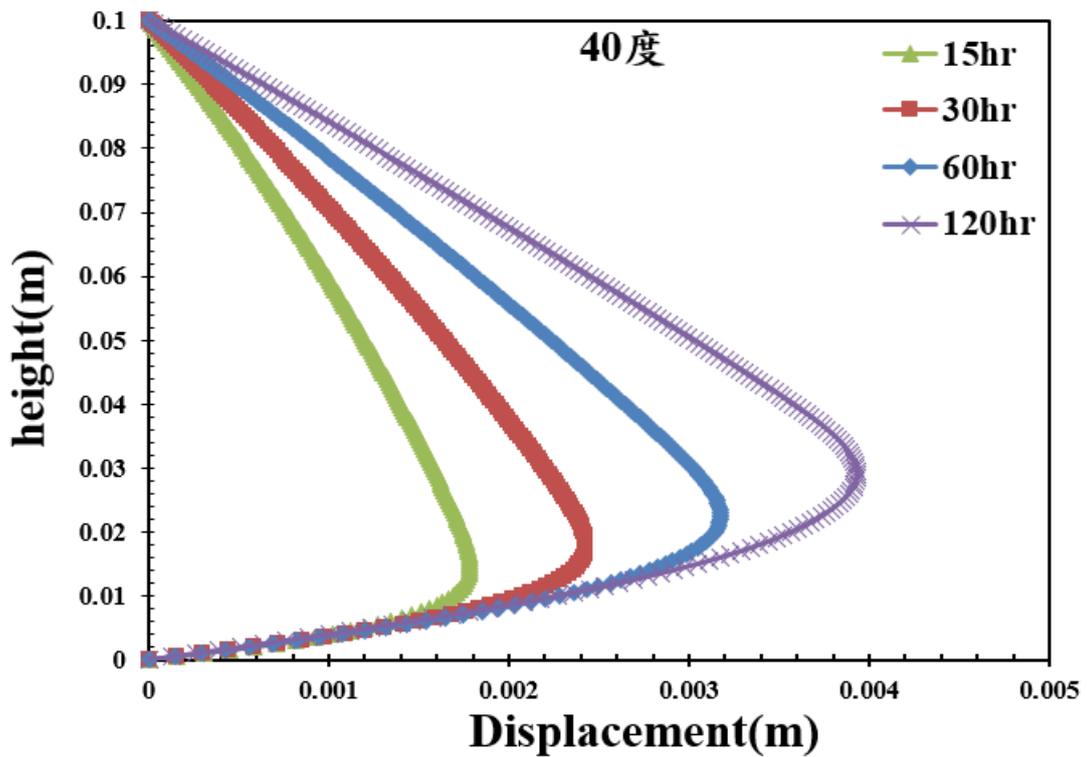


圖 4.37 模擬 40 度溫度系統之位移量歷時變化

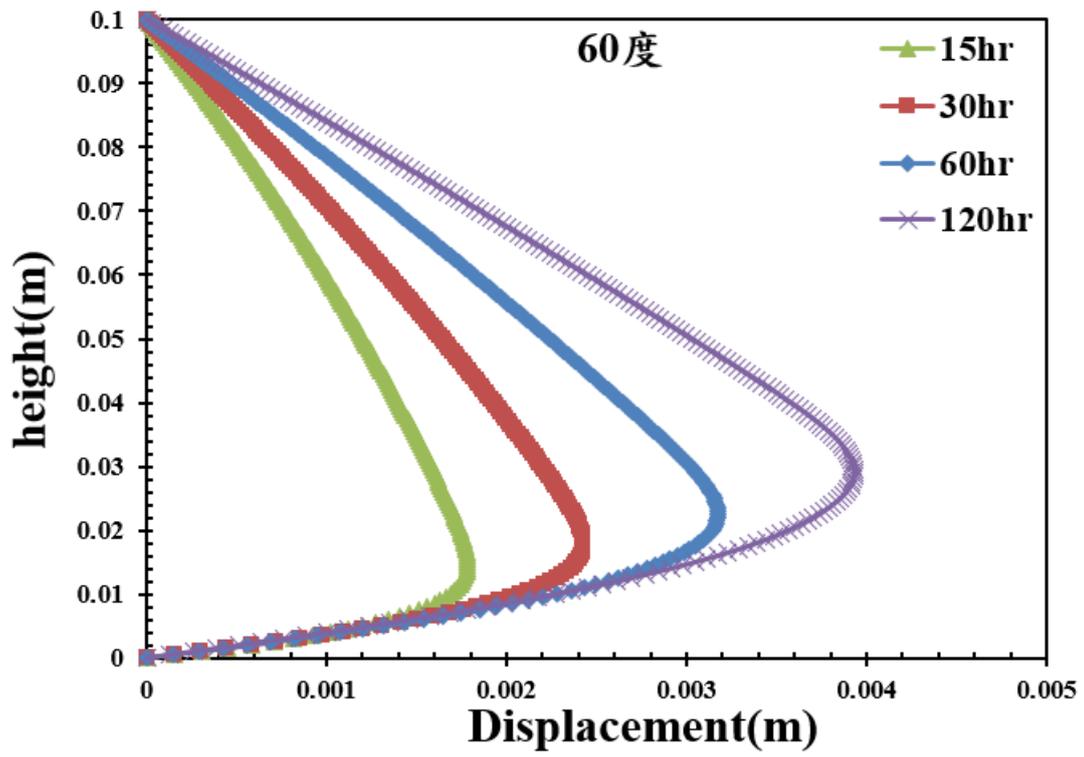


圖 4.38 模擬 60 度溫度系統之位移量歷時變化

圖 4.39 為不同溫度系統下之 120 小時後孔隙比，試體初始孔隙比 0.8667，下層 0.02 m 內土壤體積及孔隙體積因進水後皆增加，但孔隙比隨試體高度增加而逐漸下降，至 0.04 m 高度時土壤孔隙比維持固定，試體上層最終孔隙比為 0.76，略低於初始孔隙比。

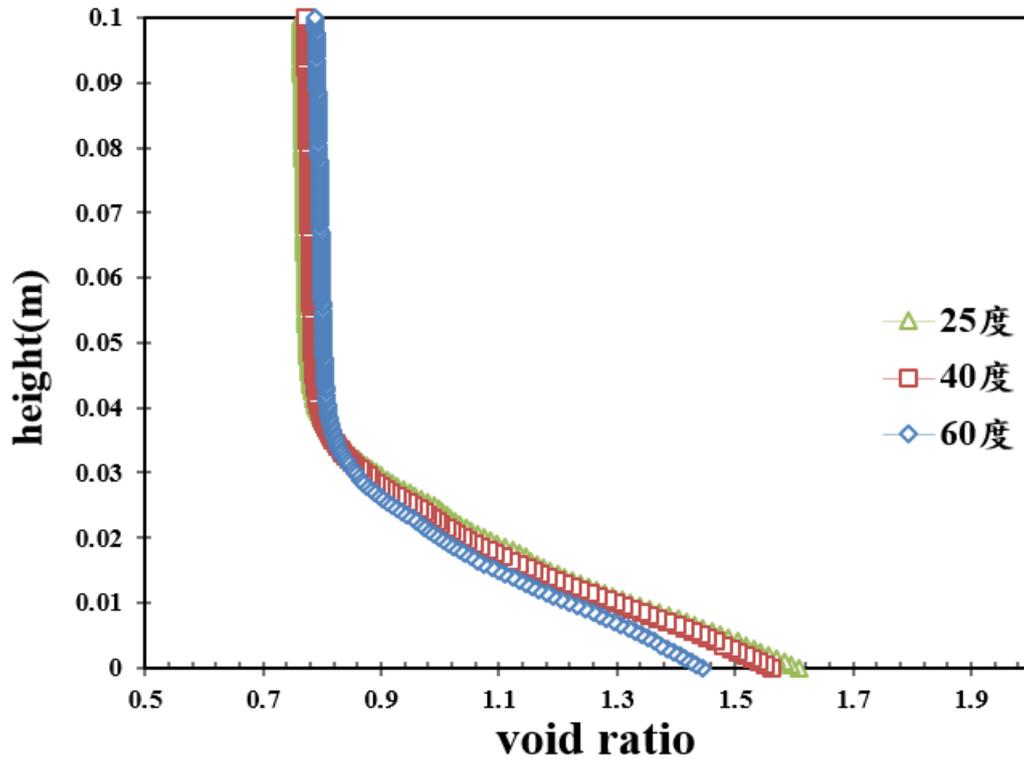


圖 4.39 25 °C、40 °C、60 °C 系統 0~0.1 m 之孔隙比變化

第五章結論與建議審查重點

5.1 結論

由第二章 THM 試驗文獻回顧瞭解，目前包含瑞典、中國、日本與西班牙採用大型試驗模擬緩衝材料之 T-H-M 效應，以供量測參數作為數值模擬的依據。其中中國及瑞典的報告中，發現緩衝材料組合之間縫隙會影響耦合過程，因此實驗與數值模擬有落差，表示熱與水會藉由縫隙間傳遞。

芬蘭的試驗中，使用不同乾密度的膨潤土下進行比較，試驗結果顯示當初始乾密度越高，將會限制膨潤土的耦合過程，減緩水入侵的時間，且在定體積的狀態下，也明顯限制回脹能力。

西班牙文獻中進行了 3 種不同尺寸與環境的試驗，結果提到試驗因周遭環境影響到溫度的變化，試驗的絕對值受此差異，但整體變化趨勢相似。在小型試驗能夠加速其過程，觀察緩衝材料內部耦合情形。

第三章針對緩衝材料回脹壓力試驗，本子計畫發現緩衝材料在高溫的環境下，會降低其最終回脹壓力；在模擬海水入侵的情況下，回脹壓力歷時曲線由典型的雙峰變為單峰狀態，且濃度越高，最終回脹壓力越低；而在模擬地下水通過混凝土障壁所產生之高鹼性溶液環境，當 pH 越高，最終回脹壓力越低，穩定時間會延長，相對地當 pH 小於 13 時其影響有限。

在單向度回脹試驗中，當垂直應力越大，限制緩衝材料的回脹能力越大，另外也考慮海水入侵情況，同樣會限制其回脹能力，但垂直應力越高，影響的程度降低。

在第四章小型熱-水耦合試驗中，今年度將三相圖建立完成，且對 TDR 感測器進行改良，以方便量測及對後續數據處理，透過三相圖進行不同溫度(25°C、40°C、60°C)的小型熱-水耦合試驗，搭配分層含水量公式計算出分層含水量歷時變化，試驗結果顯示越高溫的狀態下，膨潤土之回脹能力及吸力受到限制，使得

膨潤土內部進水較慢。

小型熱-水耦合試驗結束後，利用秤重法將分層膨潤土烘乾，以驗證 TDR 系統所得之含水量相互映證，結果與秤重法相當，顯示出透過 TDR 系統可有效觀察緩衝材料內部熱-水耦合情形。

目前也嘗試利用有限元素程式 ABAQUS 進行模擬，由於對參數的定義或選擇上尚有不了解地方，導致預測結果與試驗結果有較大的差異存在，但整體變化趨勢上符合試驗的結果。

5.2 建議審查重點或注意事項

1. 實際情況下最終處置場可能遭遇多個效應同時耦合作用，因此未來試驗需同時考量多項近場因子，更符合實際近場環境狀況。
2. 建議可提高垂直應力部份，使效應對回脹行為影響更加明顯，也探討不同溶液系統與垂直應力共同作用下對膨潤土回脹性能之影響。
3. 現階段試體之進水方式係以恆溫水槽加熱至設定溫度後，再將試體置於水中以自然吸水方式由底部進水，建議未來先將進水口密封，使試體與設定溫度平衡後開始浸水，以確實模擬最終處置場之耦合模式。
4. 現階段係以自然吸水方式進水，影響範圍及實驗速度有限，未來若試體若提高乾密度，恐怕實驗速度會大幅降低，建議考慮以加壓方式進水，提高實驗速度及影響範圍。

參考文獻

- 陳文泉，(2004)，「高放射性廢棄物深層地質處置緩衝材料之回脹行為研究」，國立中央大學土木工程學系，博士論文。
- 王雅薇，(2008)，「緩衝材料在熱/水力耦合作用下溫度分布與水力傳導性研究」，國立中央大學，碩士論文。
- 行政院原子能委員會，(2010)，「放射性物料管理法」，行政院原子能委員會放射性物料管理局，華總一義字第 09100248760 號。
- 林伯聰，(2013)，「國際高放射性廢棄物最終處置場址技術準則之研究」，行政院原子能委員會放射性物料管理局，委託研究計畫研究報告。
- 黃偉慶，(2014)，「用過核子燃料深層地質處置場近場緩衝材料耦合效應研析」，行政院原子能委員會放射性物料管理局，委託計畫研究期末報告。
- 台灣電力公司，(2015)，「用過核子燃料最終處置計畫潛在處置母岩特性調查與評估階段」，103 年度成果報告上冊。
- 鈴木英明，藤崎淳，藤田朝雄，(1994)，「緩衝材の地球化学プロセスに着目した熱-水-化学連成挙動に関する工学規模の人工バリア試験と解析評価」，原子力バックエンド研究，Vol.16 No.1。
- 幌延深地層研究センター，(2016)，幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験計測データ集(平成27年度)，JAEA-Data/Code Vol. 005
- 幌延深地層研究センター，(2016)，幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験-大口径掘削機の開発、模擬オーバーパック、緩衝材および埋め戻し材の製作-(平成27年度)，JAEA research Vol. 10
- 幌延深地層研究センター，(2016)，幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験-平成27年研究計畫成果、平成28年研究計畫，JAEA 報告会等配布資料

- L. Chen, Y.M. Liu, J.Wang, S.F. Cao, J.L. Xie, L.K. Ma, X.G. Zhao, Y.W. Li, J. Liu .(2014).“Investigation of the thermal-hydro-mechanical (THM) behavior of GMZ bentonite in the China-Mock-up test ” ,Engineering Geology Vol.172, pp. 57–68
- ISRM .(1981). “Rock Characterization, Testing and Monitoring”, ISRM suggested methods. ed. E.T. Brown.publ. Pergamon Press, Oxford, pp. 211
- Jingbo Zhao, Liang Chen, Frederic Collin , Yuemiao Liu, JuWang(2016), “Numerical modeling of coupled thermal-hydro-mechanical behavior of GMZ bentonite in the China-Mock-up test” Engineering Geology, Vol.214 pp. 116–126
- SKB(2014). “Tests and simulations of THM processes relevant for the buffer installation”,SKB P 14-22
- M.V. Villar, P.L. Martín, I. Bárcena, J.L. García-Siñeriz, R. Gómez-Espina, A. Lloret,(2012), “Long-term experimental evidences of saturation of compacted bentonite under repository conditions”, Engineering Geology
- Xavier Pintado, Hassan Md. Mamunul ,Jari Martikainen.(2013),“Thermo-Hydro-Mechanical Tests of Buffer Materia”,IPOSIVA 2012-49