

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

土石壩滲漏之啟發式反算分析

Back Analyses of Earthdam Seepage Problems using
Heuristic Optimization Method

The logo of National Tsing Hua University is a circular seal with a gear-like outer edge. Inside the seal, there is a stylized building and the letters 'ES' and 'A' are visible. The year '1896' is also present at the bottom of the seal.

研究生：康詩凰

指導教授：潘以文 博士

中華民國一百年七月

土石壩滲漏之啟發式反算分析

Back Analyses of Earthdam Seepage Problems using Heuristic
Optimization Method

研 究 生：康詩凰

Student：Shih-Huang Kang

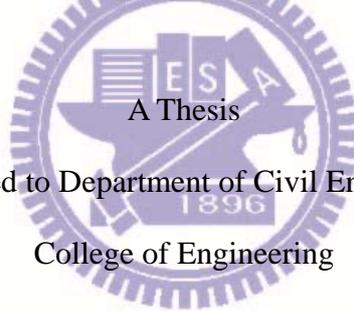
指 導 教 授：潘以文 博士

Advisor：Dr. Yii-Wen Pan

國 立 交 通 大 學

土 木 工 程 學 系

碩 士 論 文



Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Civil Engineering

July 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年七月

土石壩滲漏之啟發式反算分析

學生：康詩凰

指導教授：潘以文 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

中文摘要

台灣蓄水庫最常見之壩體型態為土石壩。依國外土石壩壩體破壞案例所累積之經驗，除壩頂溢流潰決破壞外，壩體滲漏亦為造成管湧破壞主要原因之一。管湧會造成壩體突然、全面之破壞，後果非常嚴重，日常需要透過滲漏量與水壓監測等數據來研判安全性。監測數據若有異常、有必要透過壩體內部問題診斷來尋求真正原因。本研究旨在透過啟發式最佳化反算分析，以土石壩滲流相關問題為例，期運用監測數據，配合數值模擬分析，找出對應異常監測數據之可能原因，目標在建構壩體異常問題診斷與詮釋之方法。本研究最佳化演算法採用和弦搜尋法，反算分析中以 MATLAB 作為和弦搜尋最佳化流程之主控伺服，常用之地工分析軟體 FLAC 則扮演計算引擎之角色。藉由相通介面資料傳遞至外部檔案方式進行兩種不同軟體間之溝通，可達到整體最佳化搜尋過程自動化之優點。本研究先藉兩座型態迥異之土石壩案例進行驗證分析，再以新山壩實際案例擬定兩種問題型態之境，以評估本研究所研擬之和弦搜尋演算法應用於土石壩滲流問題診斷之功效，以說明此方法之可行性與有效性。

關鍵字：土石壩、滲流、啟發式最佳化演算法、和弦搜尋演算法

Back analyses of earth-dam seepage problems using heuristic optimization method

Student : Shih-Huang Kang

Advisor : Dr. Yii-Wen Pan

Department of Civil Engineering

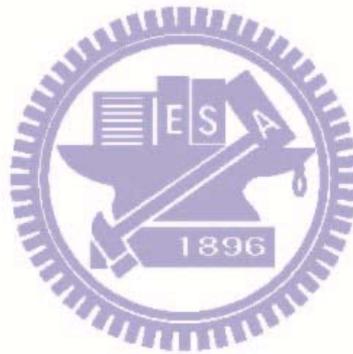
National Chaio Tung University

ABSTRACT

Embankment dam is the most common type of dams in Taiwan. Besides dam failure caused by overflow erosion, piping due to seepage is one of the major reason that may result in the breach of an embankment dam. Piping failure tends to take place unexpectedly and catastrophically. A proper program of monitoring for seepage and water pressure can help to reduce the chance of piping failure. When unusual monitored data occurs, an appropriate diagnosis will be essential to look for the real cause and timely solve the problem. This thesis aims to propose a diagnosis procedure by means of back analyses of earth-dam seepage problems using one of the heuristic optimization methods - the harmonic search method. This procedure incorporates the harmonic search algorithm into MATLAB as the optimization server and a commercial numerical simulation tool FLAC as the simulation engine to allow the simulated results match the monitoring data. A common data

file serves as the interface communicating between MATLAB and FLAC. This work also makes use of two earth-dam seepage problems to demonstrate the feasibility and applicability of the proposed diagnosis procedure.

Key Words : Embankment, Seepage, Heuristic optimization algorithm, Harmony search algorithm.



誌謝

首先，在此要特別感謝我的指導教授 潘以文博士，於求學期間不時給予學生研究理念上的啟蒙，感謝您給予學生這麼有趣的研究題目，特別在論文研究期間，非常感謝您盡心盡力的指導，讓學生能以不同角度去思考來瞭解問題並且能感受到研究的樂趣，此外，也非常感謝您於百忙中付出極大心力為學生審查、修改論文，使本論文能順利完成，在此，學生我獻上最衷心的感激與最深的敬意。

接著我要感謝教授 廖志中博士，於研究所求學與開會期間，能適時提供學生一些寶貴經驗與建議，豐富學生審視問題角度，並感謝您常以有個性、很帥氣的方式切入重點來提醒學生需注意的重要事項。此外，要感謝口試委員 黃燦輝教授、馮正一教授、林炳森教授與王承德教授對本論文提供許多寶貴的建議與指正。

另外，於論文研究期間我要特別感謝李聰吉學長不厭其煩地幫我解惑並給予幫助。感謝明萬學長、國維學長、偉欽學長、偉晉學長與其他學長姐們的幫忙與照顧。此外也很感謝我的同學若瑜、楚鈞、紹兄、大霆與黃門、林門、單門和方門的同學們於這兩年求學期間的互相砥礪與幫助，並謝謝學弟妹們於口試期間的幫忙。謝謝！

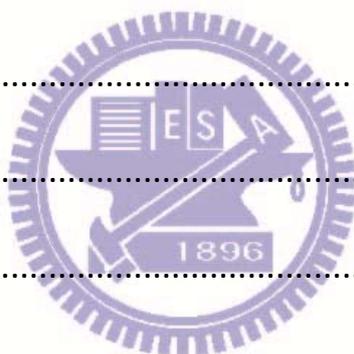
最後，就是要感謝我的阿嬤、老爸、老媽與姐弟妹們和朋友們的支持與激勵，使我能順利完成學業。僅以本文獻予我最敬愛的家人、師長與親友們，我愛你們！

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iv
目錄	v
表目錄	viii
圖目錄	x
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究流程	2
1.3 論文內容	6
第二章 文獻回顧	7
2.1 工程最佳化演算法與基本架構	7
2.2 工程最佳化問題型態與演算法	10
2.2.1 最佳化問題型態	10
2.2.2 常見最佳化演算法	12
2.2.3 最佳化演算法之優缺點	20
2.3 啟發式最佳化演算法	23

2.3.1 常見啟發式最佳化演算法	23
2.3.2 啟發式最佳化演算法應用之相關研究	35
2.4 小結	42
第三章 研究方法	43
3.1 最佳化問題型態	43
3.2 電腦輔助程式與最佳化方法選擇	46
3.2.1 MATLAB (MATrix LABoratory 的簡稱)	46
3.2.2 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)	47
3.2.3 最佳化演算法的選擇	47
3.3 最佳化流程擬定	48
3.3.1 鯉魚潭與新山土石壩之簡介與斷面選定	48
3.3.2 和弦搜尋最佳化演算流程之擬定	58
3.4 研究案例模擬之策略與規劃	65
3.4.1 驗證方案之規劃	65
3.4.2 新山壩案例研究之規劃	72
第四章 最佳化搜尋模式之驗證	78
4.1 鯉魚潭壩案例驗證之結果	80
4.2 新山壩案例驗證之結果	84
4.3 小結	92
第五章 和弦搜尋法反算 - 新山壩案例	95

5.1 情境 1 反算分析結果.....	97
5.2 情境 2 反算分析結果.....	105
5.3 結果與討論.....	113
5.4 新山壩案例現況之綜合探討.....	115
5.5 和弦搜尋最佳化法探討新山壩案例.....	128
5.5.1 三種水平濾層透水性分布假設狀況.....	129
5.5.2 三種透水性分布型態之最佳化求解結果.....	138
5.5.3 小結.....	155
第六章 結論與建議.....	156
6.1 結論.....	156
6.2 建議.....	159
參考文獻.....	162



表目錄

表 2.1 傳統與啟發式最佳化演算法之比較	22
表 2.2 生物演化之比較.....	32
表 2.3 Intensification 與 Diversification 之比較.....	34
表 2.4 Intensification 與 Diversification 主控參數與 5 個演算法說明	34
表 2.5 六個常見最佳化方法適用性比較.....	40
表 3.1 鯉魚潭壩體材料之透水係數 (單位:cm/sec).....	50
表 3.2 FLAC 初步模擬鯉魚潭大壩之相關資料.....	50
表 3.3 FLAC 初步模擬新山壩之相關資料.....	58
表 3.4 鯉魚潭壩驗證方案之參數設定.....	67
表 3.5 新山壩驗證方案各材料之透水係數(單位:cm/sec).....	69
表 3.6 新山壩驗證方案之參數設定.....	70
表 3.7 新山壩案例研究情境 1 之參數設定.....	73
表 3.8 新山壩案例研究情境 2 之參數設定.....	76
表 4.1 鯉魚潭壩案例之壩體材料滲透係數(單位:cm/sec).....	80
表 4.2 鯉魚潭壩案例之真實值與最佳 HM_{130} 之比較.....	83
表 4.3 新山壩案例之壩體材料滲透係數(單位:cm/sec).....	84
表 4.4 新山案例之各目標因子設計值.....	84

表 4.5 新山壩案例之原設計值與最佳 HM_{350} 之比較	91
表 4.6 鯉魚潭壩與新山壩案例模擬比較	94
表 5.1 新山壩體材料之透水係數 (單位: cm/sec)	96
表 5.2 方案 1 之目標因子觀測值	97
表 5.3 情境 2 之目標因子觀測值	105
表 5.4 新山壩現況模擬之壩材透水係數(單位:cm/sec)	122
表 5.5 新山壩兩段式之參數設定	131
表 5.6 新山壩三段式之參數設定	134
表 5.7 新山壩漸進式之參數設定	137



圖目錄

圖 1.1 土石壩滲流之最佳化問題反算流程圖	3
圖 1.2 研究流程圖	5
圖 2.1 工程最佳化演算法(改繪自 Reklaitis 等人, 1983).....	7
圖 2.2 單變數模式(改繪自 Reklaitis et al., 1995).....	11
圖 2.3 常見最佳化問題型態分類與適用之數學方法	18
圖 2.4 HS 模擬與設計變數對照圖(Lee & Geem, 2005).....	29
圖 2.5 和弦搜尋最佳化演算法流程圖(Lee & Geem, 2005).....	31
圖 2.6 新和弦產生之概念(修自 Lee 和 Geem, 2005).....	31
圖 2.7 啟發式最佳化演算法依模擬現象不同分類	33
圖 3.1 執行最佳化問題型態流程圖.....	43
圖 3.2 土石壩相關滲流問題示意圖	44
圖 3.3 鯉魚潭大壩標準斷面圖(經濟部水利署中區水資源局, 2007)	49
圖 3.4 鯉魚潭壩體材料分區(陳冠亨, 2006).....	50
圖 3.5 鯉魚潭壩網格建立(1 網格尺寸為 4m×4m)與初步分析之飽和 度圖	50
圖 3.6 新山水庫俯視圖(Google 地球).....	51
圖 3.7 新山大壩 Sta.0+195.29 橫斷面圖(改繪自 國立交通大學, 2010)	

.....	51
圖 3.8 新山壩俯視圖(改繪自 國立交通大學, 2010)	53
圖 3.9 新山壩 Sta.0k+170m 斷面圖(改繪自 國立交通大學, 2010)	53
圖 3.10 D4 量水堰排除降雨影響之滲水量與庫水位關係圖(國立交通大學, 2010)	54
圖 3.11 排除降雨影響之壩體總滲水量與庫水位關係圖(國立交通大學, 2010)	54
圖 3.12 新山水庫滲漏位置圖(陳冠亨, 2006)	55
圖 3.13 新山壩斷面各材料透水係數分布圖(單位:cm/sec)(國立交通大學, 2010)	56
圖 3.14 FLAC 模擬新山壩 Sta.0+170m 與材料參數圖	57
圖 3.15 FLAC 網格建立(1 網格尺寸為 2m×2m)與初步分析飽和度圖	57
圖 3.16 水位觀測井對應於下游殼層位置圖	57
圖 3.17 和弦搜尋(HS)最佳化演算流程圖	59
圖 3.18 新山壩下游殼層存在高透水路徑示意圖	60
圖 3.19 鯉魚潭壩驗證方案擬定示意圖(改編自 陳冠亨, 2006)	65
圖 3.20 新山壩驗證方案擬定示意圖	68
圖 3.21 新山壩驗證方案之浸潤面與水位井位置	68
圖 3.22 研究情境 1_壩體下游殼層高透水路徑擬定示意圖	74

圖 3.23 研究情境 2_壩體下游殼層高透水路徑擬定示意圖	77
圖 4.1 鯉魚潭壩案例之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖	80
圖 4.2 鯉魚潭壩案例之迭代次數與 HM 滲流量之關係圖	81
圖 4.3 鯉魚潭壩案例之迭代次數與 HM 心層(k_h)變數之關係圖	82
圖 4.4 鯉魚潭壩案例之迭代次數與 HM 殼層(k)變數之關係圖	82
圖 4.5 鯉魚潭壩案例之最佳和弦(H)飽和度圖(N=109).....	82
圖 4.6 新山壩案例之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖	85
圖 4.7 新山壩案例之迭代次數與 HM 滲流量因子之關係圖	86
圖 4.8 新山壩案例之迭代次數與 HM 總水頭因子(th1)之關係圖	86
圖 4.9 新山壩案例之迭代次數與 HM 總水頭因子(th2)之關係圖	86
圖 4.10 新山壩案例之迭代次數與 HM 下游殼層(k_h)變數之關係圖	87
圖 4.11 新山壩案例之迭代次數與 HM < 型濾層(k_h)變數之關係圖	87
圖 4.12 新山壩案例之迭代次數與 HM < 型濾層(k_v)變數之關係圖	88
圖 4.13 新山壩案例之迭代次數與 HM 水平濾層(k)變數之關係圖	88
圖 4.14 新山壩案例之 HM 最佳搜尋結果之飽和度圖	90
圖 4.15 新山壩案例之 HM 最佳搜尋結果之壩材變數圖	90
圖 5.1 情境 1 之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖	98
圖 5.2 情境 1 之迭代次數與 HM 各目標因子之關係圖	98
圖 5.3 情境 1 之目標因子距離與次數之關係圖	99

圖 5.4 情境 1 之 1_HM ₀ 之材料分區與飽和度分布圖	99
圖 5.5 情境 1 之 2_HM ₀ 之材料分區與飽和度分布圖	100
圖 5.6 情境 1 之 3_HM ₀ 之材料分區與飽和度分布圖	100
圖 5.7 情境 1 之 4_HM ₀ 之材料分區與飽和度分布圖	100
圖 5.8 情境 1 之 5_HM ₀ 之材料分區與飽和度分布圖	100
圖 5.9 情境 1 之 6_HM ₀ 之材料分區與飽和度分布圖	101
圖 5.10 情境 1 之 7_HM ₀ 之材料分區與飽和度分布圖	101
圖 5.11 情境 1 之 8_HM ₀ 之材料分區與飽和度分布圖	101
圖 5.12 情境 1 之 9_HM ₀ 之材料分區與飽和度分布圖	101
圖 5.13 情境 1 之 10_HM ₀ 之材料分區與飽和度分布圖	102
圖 5.14 情境 1 之 HM ₂₀₀ 之材料分區與飽和度分布圖(N=171).....	102
圖 5.15 情境 1 之 HM ₂₀₀ 之材料分區與飽和度分布圖(N=173).....	102
圖 5.16 情境 1 之 HM ₂₀₀ 之材料分區與飽和度分布圖(N=175).....	103
圖 5.17 情境 1 之 HM ₂₀₀ 之材料分區與飽和度分布圖(N=83)	103
圖 5.18 情境 1 之 HM ₂₀₀ 之材料分區與飽和度分布圖(N=137).....	103
圖 5.19 情境 1 之 HM ₂₀₀ 之材料分區與飽和度分布圖(N=103).....	103
圖 5.20 情境 1 之 HM ₂₀₀ 之材料分區與飽和度分布圖(N=42)	104
圖 5.21 情境 1 之 HM ₂₀₀ 之材料分區與飽和度分布圖(N=122).....	104
圖 5.22 情境 1 之 HM ₂₀₀ 之材料分區與飽和度分布圖(N=194).....	104

圖 5.23 情境 1 之 HM_{200} 之材料分區與飽和度分布圖(N=130).....	104
圖 5.24 情境 2 之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖	106
圖 5.25 情境 2 之迭代次數與 HM 各目標因子之關係圖	107
圖 5.26 情境 2 之 1_ HM_0 之材料分區與飽和度分布圖	107
圖 5.27 情境 2 之 2_ HM_0 之材料分區與飽和度分布圖	107
圖 5.28 情境 2 之 3_ HM_0 之材料分區與飽和度分布圖	108
圖 5.29 情境 2 之 4_ HM_0 之材料分區與飽和度分布圖	108
圖 5.30 情境 2 之 5_ HM_0 之材料分區與飽和度分布圖	108
圖 5.31 情境 2 之 6_ HM_0 之材料分區與飽和度分布圖	108
圖 5.32 情境 2 之 7_ HM_0 之材料分區與飽和度分布圖	109
圖 5.33 情境 2 之 8_ HM_0 之材料分區與飽和度分布圖	109
圖 5.34 情境 2 之 9_ HM_0 之材料分區與飽和度分布圖	109
圖 5.35 情境 2 之 10_ HM_0 之材料分區與飽和度分布圖	109
圖 5.36 情境 2 之 HM_{115} 之材料分區與飽和度分布圖(N=101).....	110
圖 5.37 情境 2 之 HM_{115} 之材料分區與飽和度分布圖(N=104).....	110
圖 5.38 情境 2 之 HM_{115} 之材料分區與飽和度分布圖(N=49).....	111
圖 5.39 情境 2 之 HM_{115} 之材料分區與飽和度分布圖(N=74).....	111
圖 5.40 情境 2 之 HM_{115} 之材料分區與飽和度分布圖(N=41).....	111
圖 5.41 情境 2 之 HM_{115} 之材料分區與飽和度分布圖(N=47).....	111

圖 5.42 情境 2 之 HM ₁₁₅ 之材料分區與飽和度分布圖(N=90).....	112
圖 5.43 情境 2 之 HM ₁₁₅ 之材料分區與飽和度分布圖(N=77).....	112
圖 5.44 情境 2 之 HM ₁₁₅ 之材料分區與飽和度分布圖(N=103).....	112
圖 5.45 情境 2 之 HM ₁₁₅ 之材料分區與飽和度分布圖(N=60).....	112
圖 5.46 模擬平台出水之材料分區與飽和度分布圖	116
圖 5.47 D4 量水堰滲漏量(1/8).....	117
圖 5.48 D4 量水堰滲漏量(2/8).....	117
圖 5.49 D4 量水堰滲漏量(3/8).....	118
圖 5.50 D4 量水堰滲漏量(4/8).....	118
圖 5.51 D4 量水堰滲漏量(5/8).....	118
圖 5.52 D4 量水堰滲漏量(6/8).....	119
圖 5.53 D4 量水堰滲漏量(7/8).....	119
圖 5.54 D4 量水堰滲漏量(8/8).....	120
圖 5.55 新山壩現況模擬之材料分區圖	122
圖 5.56 新山壩現況模擬之飽和度分布圖	122
圖 5.57 兩段式濾層分區圖與飽和度分布圖(#1 與#2 之後).....	123
圖 5.58 兩段式濾層分區圖與飽和度分布圖(#2 與#3 之後).....	124
圖 5.59 兩段式濾層分區圖與飽和度分布圖(緊鄰#3 之後).....	124
圖 5.60 兩段式濾層分區圖與飽和度分布圖(遠離#3 之後).....	125

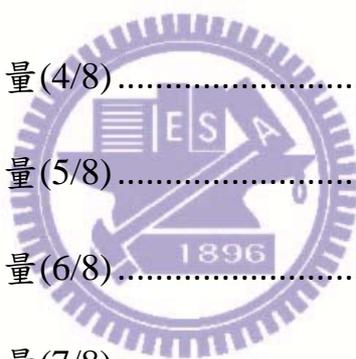


圖 5.61 三段式濾層分區圖與飽和度分布圖(遠離#3 之後)	126
圖 5.62 四段式濾層分區圖與飽和度分布圖(遠離#3 之後)	126
圖 5.63 水平濾層之透水係數變化段示意圖	128
圖 5.64 水平濾層之透水係數兩段式示意圖	129
圖 5.65 水平濾層之透水係數三段式示意圖	131
圖 5.66 水平濾層之透水係數漸進式示意圖	135
圖 5.67 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖	138
圖 5.68 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 滲流量因子之關係圖	139
圖 5.69 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th1)之關係圖	139
圖 5.70 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th2)之關係圖	139
圖 5.71 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th3)之關係圖	140
圖 5.72 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 第一段起始位置(cut1_end) 之關係圖	140
圖 5.73 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 第二段起始位置(cut2_end) 之關係圖	141
圖 5.74 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 第一段水平濾層(kh_filter3) 之關係圖	141
圖 5.75 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 第二段水平濾層(kh_filter4)	

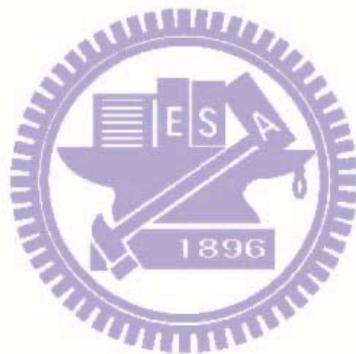
之關係圖	141
圖 5.76 新山壩兩段式之 HM 最佳搜尋結果之飽和度圖	142
圖 5.77 新山壩兩段式之 HM 最佳搜尋結果之壩材變數圖	142
圖 5.78 新山壩三段式之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖	143
圖 5.79 新山壩三段式之迭代次數與 HM 滲流量因子之關係圖	144
圖 5.80 新山壩三段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th1)之關係圖	144
圖 5.81 新山壩三段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th2)之關係圖	144
圖 5.82 新山壩三段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th3)之關係圖	145
圖 5.83 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第一段起始位置(cut1_end) 之關係圖	145
圖 5.84 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第二段起始位置(cut2_end) 之關係圖	146
圖 5.85 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第三段起始位置(cut3_head) 之關係圖	146
圖 5.86 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第一段水平濾層(kh_filter3) 之關係圖	146
圖 5.87 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第二段水平濾層(kh_filter4) 之關係圖	147

圖 5.88 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第三段水平濾層(kh_filter5) 之關係圖	147
圖 5.89 新山壩三段式之 HM 最佳搜尋結果之飽和度圖	148
圖 5.90 新山壩三段式之 HM 最佳搜尋結果之壩材變數圖	148
圖 5.91 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖	149
圖 5.92 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 滲流量因子之關係圖	150
圖 5.93 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th1)之關係圖	150
圖 5.94 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th2)之關係圖	150
圖 5.95 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th3)之關係圖	151
圖 5.96 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 變化段上游起始位置 (cut_end)之關係圖	151
圖 5.97 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 變化段上游起始垂直透水係 數(kv_head)之關係圖	152
圖 5.98 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 變化段上游起始水平透水係 數(kh_head)之關係圖	152
圖 5.99 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 變化段垂直透水係數之次數 (n_kv)之關係圖	152
圖 5.100 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 變化段水平透水係數之次	

數(n_{kh})之關係圖 153

圖 5.101 新山壩漸進式之 HM 最佳搜尋結果之飽和度圖 154

圖 5.102 新山壩漸進式之 HM 最佳搜尋結果之壩材變數圖 154



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

台灣地形陡峭、河川短促，降雨後雨水迅速流入海洋，又因降雨四季分配不均，以致常面臨缺水危機，藉由建造水庫以儲蓄水源乃是最直接及不得已之水源開發手段。受限於地質條件，台灣水庫最常見之壩體型態為土石壩，以堆填之土石堤壩發揮阻水功能以蓄水。

過去國外不乏土石壩破壞之案例，土石壩常見之破壞主要原因包括庫水溢頂潰決、管湧或邊坡滑動破壞。溢頂潰決一般因為集水區帶來流量超過本身設計容量、或因管理不當或壩體嚴重沉陷等因素，導致水流溢頂而直接沖刷壩體造成破壞，因此需透過水文分析、水庫管理與操作來降低風險。邊坡滑動破壞需檢討不同條件，包括剛完工、急洩降、穩態滲流、地震力影響等情境下之穩定狀況，透過位移監測與完整性檢查及檢測來評估其穩定性。管湧或邊坡滑動破壞則係導因內部結構之破壞。土石壩不可能完全無滲漏水，但若滲漏水過多，一則造成庫容之損失，更嚴重的是異常滲流水流入壩體內部、過大之水力坡降可能導致壩體內部沖蝕，逐漸擴大造成管湧終究可造成壩體全面之破壞，後果非常嚴重，日常需要透過滲漏量與水壓監測數據來研判安全性。監測數據若有異常、其異常之真正原因有必要透過壩體內

部問題診斷來尋求答案，對於水庫安全是相當重要之課題，但是如何診斷壩體內部可能出現之問題卻非常棘手。本研究旨在藉由最佳化反算分析，以土石壩滲流相關問題為例，運用監測數據，配合數值模式模擬分析，建構壩體異常問題診斷與詮釋之方法。本研究圖藉適當之最佳化演算法，配合數值模式工具軟體，以反算分析方式求解土石壩滲流相關之最佳化問題，進而找到對應異常監測數據之可能原因。

1.2 研究流程



本研究希望藉由適當之工程最佳化演算法進行土石壩滲流之反算分析。首先進行文獻回顧，整理與介紹工程最佳化演算法與其相關研究，依發展先後分別介紹傳統最佳化演算法與啟發式最佳化演算法。由於傳統最佳化演算不易直接應用於實際問題又存在計算求解上的一些缺陷，因此，進一步回顧各種啟發式最佳化演算法，並考慮本研究之問題型態與輔助程式執行之便利性，最後選擇和弦搜尋最佳化演算法(Harmony Search Optimization Algorithm)作為本研究之反算分析方法。

土石壩滲流之最佳化問題反算流程，需含最佳化演算法與土石壩滲流分析兩部分來進行，考慮現有之最佳化軟體難以撰寫複雜之滲流分析條件，或商業之滲流分析軟體可能需進一步修改原始碼以進行最

佳化流程之運作，因此本研究不同軟體分別用在最佳化反算流程與土石壩滲流分析（分別為 MATLAB 與 FLAC），利用讓兩者互通之介面（文字）檔，以外掛形式進行資料傳遞，最後以 MATLAB 作為和弦搜尋最佳化流程之主控伺服，FLAC 則扮演計算引擎之角色。計算分析之流程圖表示如圖 1.1。

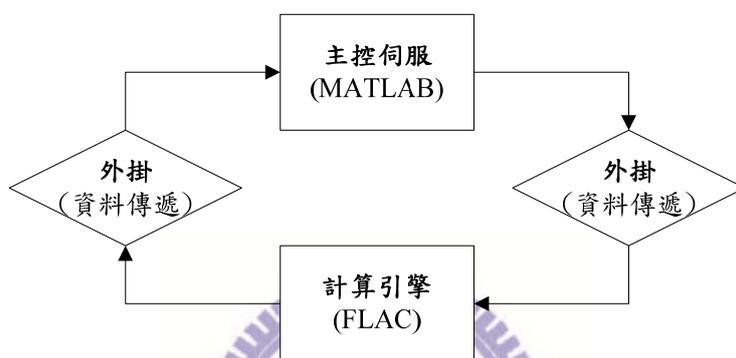


圖 1.1 土石壩滲流之最佳化問題反算流程圖

於最佳化反算之分析與應用，以兩座壩體分區明顯不同之土石壩，分別為對稱之鯉魚潭水庫大壩(以下簡稱「鯉魚潭壩」)與極不對稱之新山水庫大壩(以下簡稱「新山壩」)，作為本研究進行滲流相關之工程最佳化問題之研究案例。並且將最佳化反算分析之擬定分兩部分進行：

1. 第一部分：驗證分析

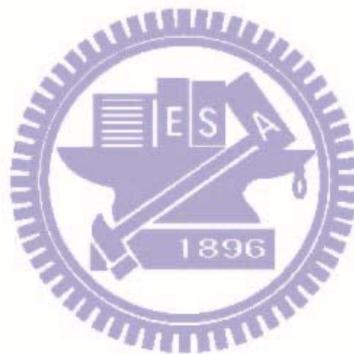
分別以鯉魚潭壩案例與新山壩案例，各假定一組視為真實值之材料參數進行滲流分析，並將結果設定為目標值，再將部分真

實值改設為待定變數，進行本研究所研擬和弦搜尋最佳化滲流反算分析之驗證。

2. 第二部分：實例應用

此部分以新山壩之實際案例為本研究之最佳化問題之研究對象，並擬定兩種情境來進行最佳化反算之研究。

最後，綜合探討研究結果與實際案例，以瞭解本研究所研擬最佳化滲流反算分析用於土石壩滲流相關之問題反算求解之功效。圖 1.2 為本研究之流程圖。



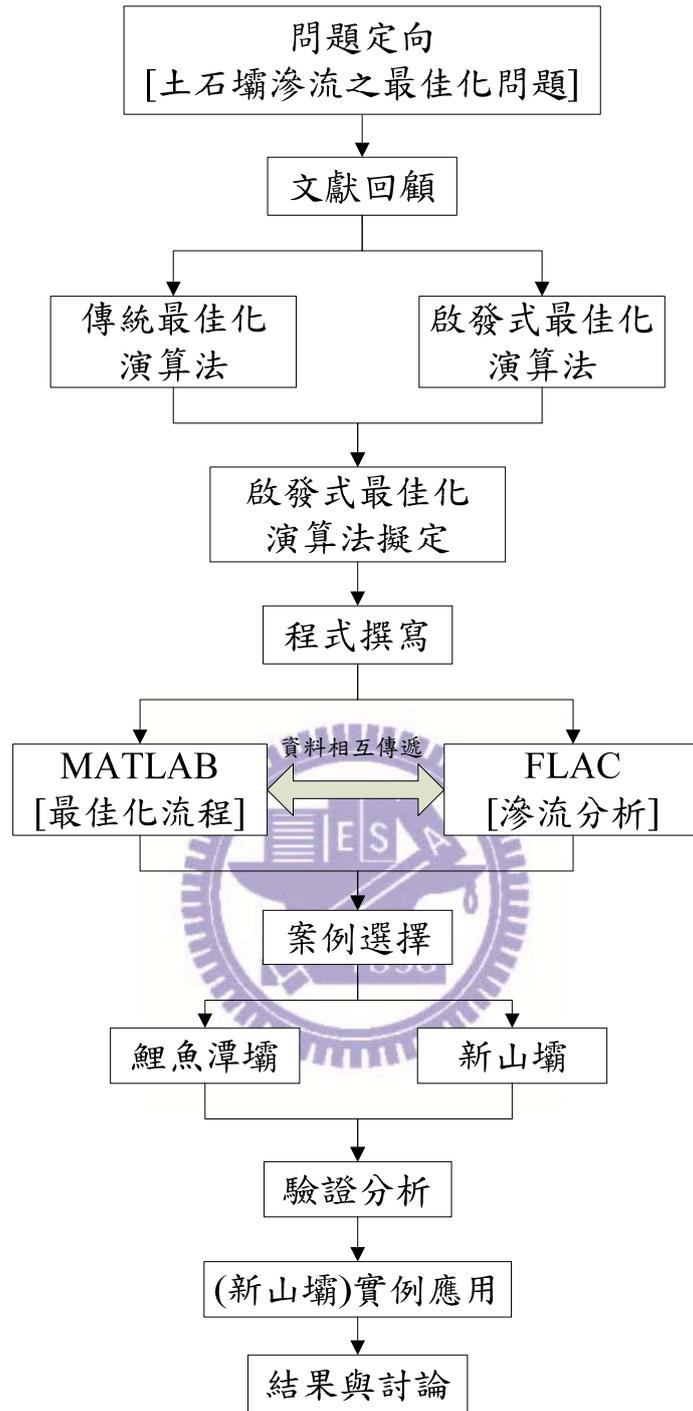


圖 1.2 研究流程圖

1.3 論文內容

本論文分為六章，除本章外，第二章為文獻回顧，回顧本研究用以反算分析之方法，即工程最佳化演算法，整理並介紹最佳化演算法之發展與相關研究，再說明為何選用和弦搜尋演算法(Harmony Search, HS)之一種進化版啟發式最佳化演算法(Meta-Heuristic Optimization Algorithm)，作為本研究進行與土石壩滲流相關之最佳化問題求解法；第三章介紹研究方法，先以本研究最佳化問題型態擬定滲流反算分析之流程，繼而配合鯉魚潭壩與新山壩之兩座土石壩，建立虛擬案例以驗證研擬之和弦搜尋演算法，並擬定新山壩實際案例作為本研究最佳化問題之研究。因此，第四章探討和弦搜尋演算法驗證之結果；第五章為新山壩案例最佳化演算結果與討論，最後再配合資料回顧與數值模擬，綜合探討新山壩案例相關問題之現況；第六章則提出結論與建議。

第二章 文獻回顧

本研究主要乃藉由一種最佳化演算法(Optimization Algorithm)作為求解最佳解之方法，2.1 節先說明工程最佳化演算法與其組成的基本架構和數學模式(Model)；2.2 節介紹最佳化方法有哪些常見的問題型態，並選擇啟發式最佳化演算法(Heuristic Optimization Algorithm)為推算土石壩滲流問題之求解方法；2.3 節進一步對啟發式最佳化演算法相關文獻做整理；最後一節（2.4 節）為小結，說明為何選擇和弦搜尋演算法(Harmony Search，HS)為本研究之最佳化演算法。

2.1 工程最佳化演算法與基本架構

工程最佳化演算法是用來求解工程上最佳化問題，經由工程之設計、規劃至決策等分析問題，無非是想節省成本、時間，求得最大效益的這種求極大值或極小值的最佳化問題。因此藉由數學技巧或數值方法將最佳化問題表示成數學模式，並以最佳化理論求解此模式，最後由最佳解闡釋整個最佳化系統，此種不用真實操作求最佳解的方式稱為「工程最佳化演算法」，表示如圖 2.1。

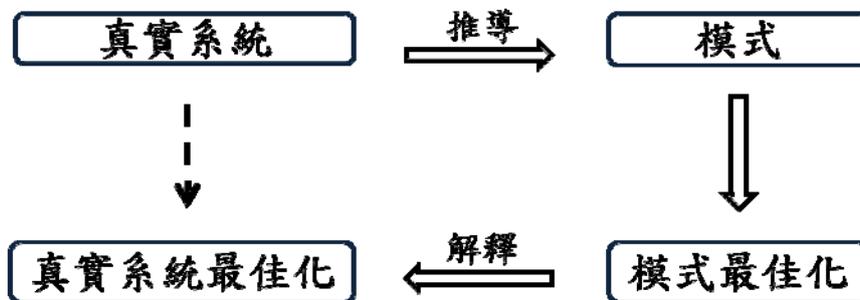


圖 2.1 工程最佳化演算法(改繪自 Reklaitis 等人，1983)

Reklaitis 等人(1983)將構成工程最佳化演算法的基本數學架構，

分成四個要件：

1. 定義最佳化問題系統邊界
2. 效能規範
3. 變數
4. 系統模式化

最佳化演算法基本數學架構組成順序說明如下：1. 如何以簡單的數學模式來說明真實最佳化問題是相當重要的，這會影響整個最佳化問題是否能有效求解，所求得解是否有意義，或者是給太多不必要的考慮條件，甚至是關鍵因子完全被忽略了。因此一開始要先清楚瞭解問題範圍，避免將問題過於簡化，也就是定義問題系統邊界；2. 接著決定問題之最佳化的目的是要滿足哪些要求，當考慮的目標不只一個時，一般會選用一個為主要目標，其他則表示為限制條件，此類之要求規定稱效能規範；3. 再來選擇能夠充分反映問題特性的因子，即設計變數，變數的選擇取決於問題考慮的仔細程度，若考慮太多不相關的變數或關鍵因子沒表達出來，可能會得到非最佳解；4. 最後一步系統模式化，也就是將上述三個要件組合起來，使整個問題系統表示為數學的模式。

典型將最佳化問題轉換成函數形式求解最大值或最小值表示方

式，如式 2-1：

$$\min. (or \max.) f(x) \quad (2-1)$$

限制條件 $h_k(x) = 0$

$$g_j(x) \geq 0$$

$$x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU} \quad (or \ x_i \in X_i = [x_i(1), \dots, x_i(S), \dots, x_i(S_i)])$$

式中，函數 $f(x)$ 稱為目標函數(objective function)；

變數 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n]^T$ ， x 向量有 n 個分量(維度)；

$h_k(x) = 0$ ，等式限制條件之 $k = 1, \dots, K$ ；

$g_j(x) \geq 0$ ，不等式限制條件之 $j = 1, \dots, J$ ；

$x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU}$ (or $x_i \in X_i = [x_i(1), \dots, x_i(S), \dots, x_i(S_i)]$)，連續(或離散)變數

限制條件之 $i = 1, \dots, n$ ， x_{iL} 、 x_{iU} 為連續變數 x_i 之下限與上限， S 表

示集合。

2.2 工程最佳化問題型態與演算法

2.2.1 最佳化問題型態

最佳化演算法依問題複雜度、考慮條件或變數間之關連性等，可分成各種不同的問題型態，而設計者可依不同問題型態選擇適當的求解方法。不論哪種最佳化問題，為了求解上的需要，基本上都會簡化為數學模式來求解，因此，下面對照式 2-1 說明一般最佳化模式之不同問題型態分類：

1. 限制性與非限制性：除了目標函數與目標變數外，不考慮任何條件時，稱非限制性最佳化模式；反之，當變數值有上、下限或目標函數需要滿足次要目標時，稱限制性最佳化模式。
2. 單變數與多變數：當變數 x 向量為一個分量時，稱為單變數最佳化模式；變數 x 向量不只一個分量時，稱為多變數最佳化模式。
3. 連續、不連續與離散變數：當變數在某設計值範圍內稱為連續變數；在不同區間考慮不同函數關係的變數稱為不連續變數；若以數量、規格、尺寸或二選一等方式為設計因子，稱離散變數，如圖 2.2。

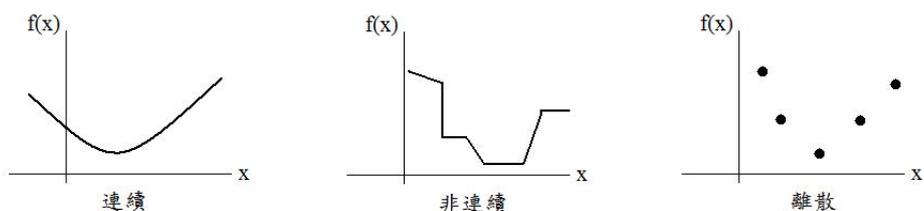


圖 2.2 單變數模式(改繪自 Reklaitis et al. , 1995)

4. 單目標與多目標：單目標最佳化模式，如 2.1 節說明工程最佳化演算法的數學架構的效能規範，也就是無論有多少個最佳化目標，目標函數只考慮一時，稱之；相對的，當目標函數代表不只一個最佳化目標時，稱多目標最佳化模式。
5. 線性與非線性規劃：當目標函數與限制條件兩者為線性模式且 x 為連續變數，稱之為線性規劃(Linear Programming, LP)問題；若目標函數為非線性則稱非線性規劃(Nonlinear Programming, NLP)。

除了上述五種分類外，還可以更細部地將最佳化法架構不同要件，組合起來分類成更多型態。另外一種特殊分類為靜、動態問題，其主要不同在於：當要求變數 x^* 是否為最佳解時，稱靜態最佳化問題；動態問題則是，要如何找出最佳解。

2.2.2 常見最佳化演算法

將最佳化問題分類成各種不同型態，讓使用者方便選擇求解方法，可依不同數學模式組成架構，有不同適用的最佳化演算法。介紹簡單的數學最佳化方法前，先以分析變數目的之靜、動態問題為兩大主體分類，並參考 Reklaitis 等人(1983)、徐業良(1995)與張斐章·張立秋(2010)之文獻，整理介紹如下：

1. 靜態問題：判斷在區域內給定之變數值 x^* 是否為最佳解(一般都可表示為最小值方式求解)。在此只簡略介紹數學判斷方法與求最佳解的基本數學概念。假設函數 f 是二次可微分，若要滿足 x^* 為區域內極小值，則 f 在 x^* 處的一階與二階微分須滿足充分和必要條件。

必要條件：

$$\nabla f(x^*) = 0 \quad (2-2)$$

$$\nabla^2 f(x^*) = H(x^*) \geq 0 \quad (2-3)$$

充分條件：

$$\text{若 } \nabla f(x^*) = 0 \text{ 且 } H(x^*) > 0$$

$$\text{其中 } H(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{pmatrix}, \text{ Hessian 矩陣。}$$

2. 動態問題：以最佳化理念和運用數學技巧等方式來找出或求得最佳解 x^* 。其概念就是給定初始值或初始條件，依循漸進推導或在問題範圍內做搜尋的迭代方式，直至求得最佳解或滿足最佳化條件為止。

此外，不論是想判斷 x^* 是否滿足最佳化的條件，還是做最佳化演算法的推導，常常利用近似法輔助求解，其中泰勒展開式(Taylor's expansion)就是一種簡單的多項式近似求解方法。在 x_0 之泰勒展開式表示如式 2-4， $n=1$ 為一次近似式， $n=2$ 為二次近似式，依此類推。

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n \quad (2-4)$$

動態問題中，再依變數量問題型態分成單變數與多變數。先以單變數模式說明基本的最佳化數學方法如下：

1. 區間消去法：搜尋邏輯為將兩測試點的函數值相互比較，其方式是將搜尋範圍的不確定區間不斷地削去縮減，找出函數最佳解，如：半區間法（二分法）、黃金切割法等，適用於連續、不連續或離散變數函數。
2. 割線法(線性內插法)：以前兩次計算值畫出一條割線，以此割線近似函數，並以割線與變數軸交點作為下次計算點之方法，也適用於連續、不連續或離散變數函數。
3. 多項式近似法(點估計法)：若變數的函數形狀夠平滑，則可用多項式簡單地去近似小區段的函數，反覆以此方式求下個估計點，來估出算最佳點，如二次估計法、波爾法(Powell Method)，只適用於連續變數問題型態。
4. 微分方法：若變數為可微分函數就能用導數方式來不斷逼近求解，如：牛頓·雷佛森法(Newton-Raphson Method)、正割法，適用於可微分的連續變數問題。

而動態問題中的多變數模式函數，基本上也是以單變數的簡單方法去做延伸，常見的最佳化演算法大致可分為三類：1. 直接搜尋法、2. 梯度法與 3. 二階法，又依求目標函數導數項次數，簡單分成零次法、一次法與二次法。

1. 第一類：直接搜尋法，只以函數值來引導最佳解的搜尋方法。

(1) 簡單搜尋法或稱 S^2 法(Simplex Method)，運用設計空間上一些模式的策略來搜尋解，有啟發的味道存在，但此種方法不考慮之前的計算數據來加快搜尋速度，因此較耗時，且只適用於二維度的問題。

(2) 虎克·吉夫斯(Hooke-Jeeves)模式搜尋法，使用問題空間變數的座標方向為搜尋方向，且特別的是能考慮之前在此方向的搜尋結果並做結合的一種搜尋策略，但不適用於目標函數形狀扭曲或細長情形，不過此方法也含有一種啟發的基本概念。

(3) 波爾(Powell)共軛方向法，以二次式近似模式的理論求解法。

2. 第二類：梯度法，需要目標函數的一階微分來定義最佳解的搜尋方向，一般搜尋速度比直接搜尋法來得快，不過計算上相對較複雜。

(1) 簡單梯度法(Simple Gradient Method)，以函數一階微分方法決定搜尋方向，並配合一個係數調整每次迭代的移動大小。

(2) 最陡坡降法(Steepest Descent Method)或稱柯契法(Cauchy's Method)，也屬於簡單梯度法一種，主要不同的是搜尋步移大小會隨每次迭代做調整。

(3) 共軛梯度法(Conjugate Gradient Method)，結合最陡坡降法與牛頓法之優點。

(4) 擬牛頓法(Quasi-Newton method)，以數值近似取代牛頓法要計算的 Hessian 矩陣。

3. 第三類：二階法，需要求 Hessian 矩陣，即計算目標函數二階導數的方法。

牛頓法(Newton's Method)，收斂速度快，但計算過程相對較繁雜。

此外，針對限制性與非限制性問題，兩者所使用的數學方法基本概念相似，主要差別在於限制問題的目標函數或變數值，也要同時滿足相關的條件。針對變數量和限制條件較少時，因目標函數與限制條件都是變數的函數，因此可使用一些方法處理這些限制式，譬如：使用拉氏函數來降低限制條件數，將目標函數擴大，相對的會增加變數量。不過，一般解此類問題還是會選擇簡單的數學搜尋方法求解。

限制性最佳化問題一些常見數學方法如下：

1. 線性規劃：傳統的高斯·喬登(Gauss-Jordan)消去法、兩變數的圖解法、標準的簡易法…等。
2. 非線性規劃：懲罰概念的轉換法…等。
3. 離散變數：整數的枝界法、序列近似法…等。
4. 多目標問題型態：折衷規劃法、分析層級程序…等。
5. 不連續或不可微分問題：直接搜尋法、隨機搜尋法…等。

將以上常見各種數學方法，適用於不同問題型態上，簡單整理如圖 2.3。其中，以六邊形表示的一些搜尋方法，可約略地發現已有近代啟發式最佳化演算法的一種全域性搜索、一種經驗式累積的雛形。

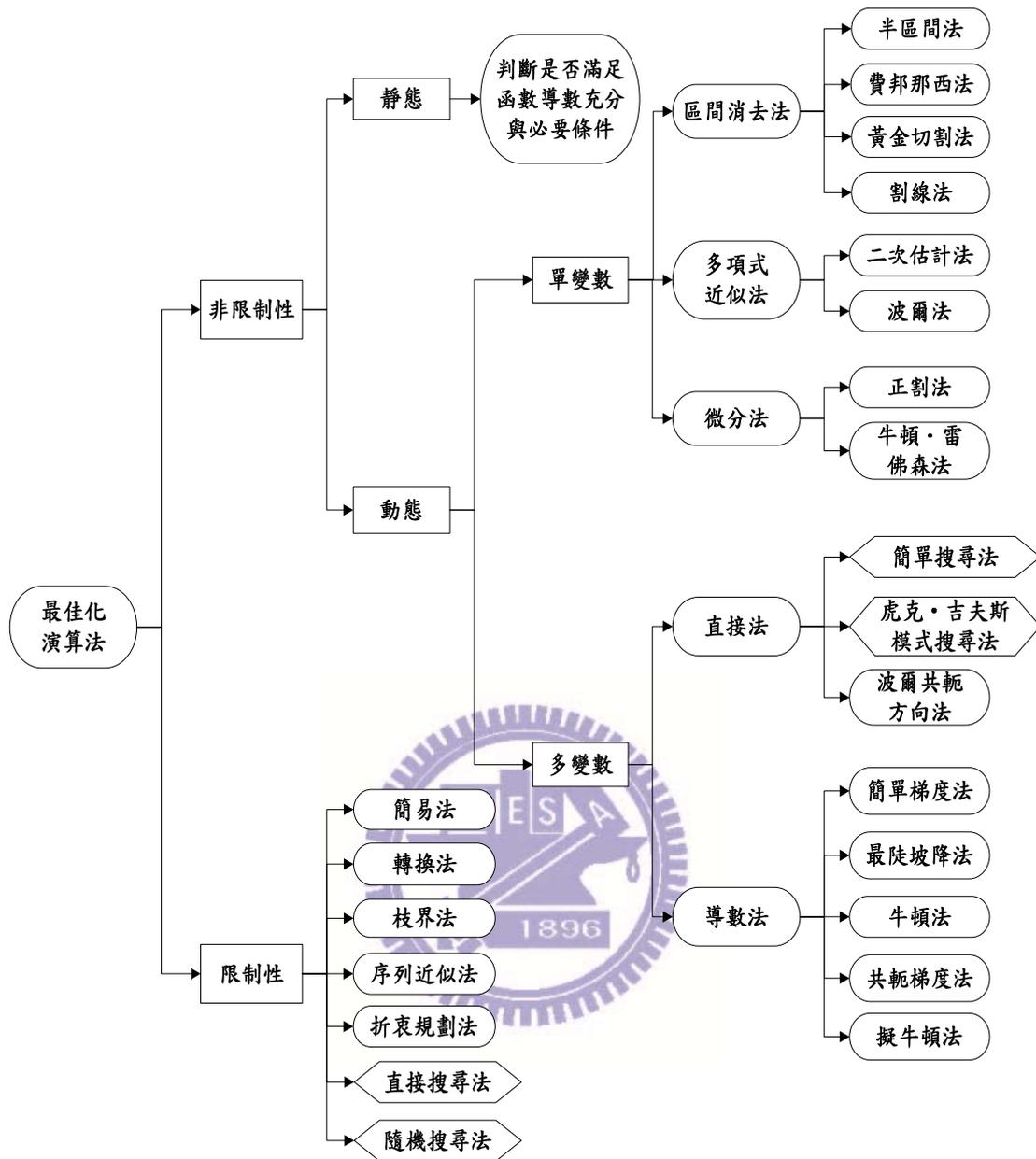


圖 2.3 常見最佳化問題型態分類與適用之數學方法

由以上可知，無論是哪種最佳化演算之數學方法，依搜尋過程所需運算的目標函數導數項次可簡單分為，零次法、一次法、二次法…、高次法。除零次法外，基本上都要運算複雜的導函數值，並且導數值要存在或連續等假設情況下才能使用。儘管這些方法在數學上的理論求解架構相當有系統性，或是所得到的最佳解符合理論最佳解抑或是極逼近最佳值，但於實際問題上的應用上可能不是單純假設或簡化可以求解的，比如：大規模的NP-complete問題（說明：若能找到一個有效方法，所需計算量隨某冪函數（polynomial）遞增，則此問題稱為P-問題； NP-問題中之NP為nondeterministic polynomial 的縮寫，意指所需計算量隨冪函數非確定性地增加，每一個求解組和儲存記憶至少需完成一次計算；NP-complete問題是NP問題中的難題，所需儲存記憶隨冪函數遞增，但不保證所需計算量只隨冪函數遞增。）或NP-hard問題（說明：NP-hard問題之計算比所有NP問題更為困難，此問題所需儲存記憶可能呈指數遞增，其所需計算量亦非呈指數遞增不可。），需要大量計算時間同時需儲存大量計算產生數值，因此必須考慮電腦或計算機的計算效率和記憶空間大小。因而近年來由最佳化演算數學方法中之零次法，逐漸發展出一系列所謂之「啟發式最佳化演算法」（Heuristic optimization algorithms），可依問題特性來設計，並能在有效計算時間內求出可被接受的近似最佳解。

啟發式演算法結合了隨機搜尋演算法的優點(如：能跳脫出，陷入局部性搜尋的困境、比較不會有數值計算上的問題產生、搜尋原理簡單和能有效搜尋到最佳解附近區域)與直接搜尋方法的優點(如：能使用當前或之前的計算值資料，類似使用者能夠考慮以往的經驗來決定下一次迭代的設計值一樣、加快收斂速度…等)。

傳統啟發式最佳化演算法的搜尋方法通常是，先利用貪心法則 (Greedy Approach) 在短時間內將問題範圍縮小至最佳解附近區域，並得近似起始點，接著再以局部最佳化方法來改善此近似值。而一般常見的啟發式最佳化演算法有：遺傳演算法(Genetic Algorithm, GA)、模擬退火法(Simulated Annealing, SA)、禁忌搜尋法(Tabu Search, TS)…等最佳化演算法，此部分在接續的 2.3 節有介紹。因此，接下來就對傳統數學最佳化演算法與啟發式最佳化演算法之優缺點做比較。

2.2.3 最佳化演算法之優缺點

由 2.2.2 節可知，傳統最佳化演算法求解過程一般順序是：先給定起始值和初始條件，以數值方法或技巧決定下一個搜尋點方向和移動步長大小，漸漸地縮小搜尋範圍並趨近鄰近的最佳解的求解法；相對的啟發式最佳化演算法的求解方式，則是在整個問題系統中做有系統性的隨機搜尋，直到滿足設計者期盼的目標值或目標條件為止。以

下對傳統最佳化演算法與啟發式最佳化演算法，在設計或求解上之優、缺點比較並整理成表 2.1。

然而，本研究希望在應用上能夠達到有效率求解，因此選用啟發式最佳化演算法並結合現有的商業分析軟體，進行土石壩滲流問題的最佳化運算。而接下來將對啟發式演算法相關文獻做整理與討論。



表 2.1 傳統與啟發式最佳化演算法之比較

	優點	缺點
傳統最佳化演算法	不用每種情況都嘗試	主觀性給定起始值
	適用較簡化或假設性問題	計算一連串的導數資料
	以導函數搜尋之收斂速度快	考慮記憶體容量大小
		屬區域性搜尋之局部最佳解
		實際應用的限制相當多
		適用範圍小
		常需要修改分析軟體原始程式
啟發式最佳化演算法	簡單搜尋概念求解	主觀性設定終止搜尋條件
	不用給定起始值	隨機搜尋之迭代方式，其收斂速度比能使用函數之導數搜尋方法慢。
	不需繁雜的數學式	
	全域性搜尋	
	能跳脫局部解情形	
	適用範圍廣	
	可完全獨立在分析軟體外	

2.3 啟發式最佳化演算法

啟發式最佳化演算法，是以理論概念將工程上最佳化問題表示成一系列的設計變數，配合模擬自然界現象等最佳化策略，啟發我們設計演算法架構，並考慮先前搜尋結果來引導下一次迭代，以隨機方式而非以導函數資料來改善最佳解的演算法，能克服傳統最佳化演算法計算上的缺陷。

2.3.1 常見啟發式最佳化演算法



啟發式演算法與一般數值最佳化演算法最大不同在於求解方式為有系統的多次隨機搜尋直到達目標條件為止，而非以計算導數值方式搜尋求解。啟發概念即套用於隨機搜尋模式中，並非毫無頭緒的隨機組合；而啟發顧名思義就是對於人事物現象之觀察有所啟示，繼而學以致用。

這類方法最大優點是：求解效果佳，且相對於傳統求解最佳化法上，較不受限於初始參數值如何明確給定的問題，並以隨機方式搜索得到的解較靈活、較能跳脫局部解情形，因此也不用記錄求解過程大量函數導數資料，應用範圍也較廣。以下簡單介紹一些常見的啟發式最佳化演算法：遺傳演算法、模擬退火法、禁忌搜尋法、螞蟻族群

演算法(Ant Colony Optimization, ACO)、粒子群法(Particle Swarm Optimization, PSO)、和弦搜尋演算法。

1. 遺傳演算法

又稱基因演算法，由 Holland 在 1975 年以達爾文進化論的「物競天擇，適者生存」所發展的一種搜尋演算法。模擬生物過程對環境的適應能力，適應力高者，表示生存能力強，因此遺傳給下一代的機率相對較大。

搜尋策略：先將變數進行編碼(Encoding)，以二位元或實數方式表示成染色體和基因的形式；隨機產生一組初始族群(Population)；並評估初始族群中，由不同染色體組成所代表的個體，即求函數值，並有各別被選取的機率大小；接著運用遺傳演算法三個運算元，進行基因的選擇(Selection)與複製(Reproduction)、交配(Crossover)和突變(Mutation)，產生下一代新的一組族群以改善當前的族群；重復更新直到達目標為止。

方法特性：無法直接應用求解，因為要先進行編碼程序；一次搜尋一組解，因此也要儲存整組解的資料；實際應用需要評估的變數量很多；較適合離散變數問題；應用上比較不受限。

2. 模擬退火法

主要是 Kirkpatrick 等人在 1983 年提出，以 Metropolis 等人在 1953 年以蒙地卡羅的統計機率觀念，模擬分子在高溫狀態下，逐漸冷卻的行為。

搜尋策略：物質在固定高溫、高能量狀態下，分子隨機散佈在範圍空間中移動，並選擇分子變數之初始值；接著在初始點附近找出一個新設計點目標值，判斷新設計值是否小於當前值，若是的話就取代當前值，否則就以隨機亂數判斷是否接受此”上坡”之設計值，其中，此接受的機率會隨溫度越低而越小，以期達到收斂之目的；再來判斷是否有足夠搜尋長度，此步驟是模擬物質緩慢降溫時，能有足夠時間讓分子找到較低的能量狀態；重覆直到達預設的最低溫為止。

方法特性：比傳統最佳化法能跳出局部解，是因為允許搜尋過程也可接受目標值較高的設計點，不過，全域性搜群能力不健全；考慮當前狀態進行搜尋；要先決定起始點；應用上要評估的點很多，且對於複雜問題所需要電腦計算時間較久；退火時程的設定問題需要去嘗試決定。

3. 禁忌搜尋法

Glover, 1986 年以模仿記憶方式所發展的一種最佳化演算法。

記憶之前搜尋結果以避免陷入局部解，也稱輔助式啟發性演算法。

搜尋策略：其求解過程與 SA 類似，先選取一起始點；接著在起始點附近，搜尋不在短期記憶之禁忌列表(Tabu List)中的下一個設計移動點，除非滿足期望法則(Aspiration Criteria)規則，就可取消此限制移動；然後比較此新設計值是否比當前設計值好，若有則取代之，否則就繼續搜尋；直到滿足終止條件止。

方法特性：要決定一起始點；短期記憶量越大，越不會陷入局部解，相對地，要儲存整個記憶列表的容量也會隨之變大；利用長期記憶提升搜尋的多樣化，不過全域性搜尋能力尚不足；應用上，特別適用工程管理方面問題。

4. 螞蟻族群演算法

Dorigo 等人於 1991 年由觀察螞蟻群覓食移動行為所發展的一種演算法。

搜尋策略：螞蟻搬運食物回程時，會分泌一種荷爾蒙的費洛蒙(Pheromone)，且荷爾蒙濃度會隨時間消散蒸發；因此，其他螞蟻可依不同濃度大小之路徑機率，去隨機選擇所要行走的路徑，並在搬運食物回程時一樣分泌費洛蒙；依此方式重覆至最後，可發現幾乎所有螞蟻都走同一條接近最短路徑，主要是因路徑越短，所需行走時間越少，相對的費洛蒙殘留濃度會較大。

方法特性：適用問題規模廣，於小型問題可在短時間得相近之最佳解，而大型問題則比其他演算法更能得較好的解；用於不同問題型態有不同效能，特別適用於路線規劃方面問題；此外，費洛蒙表示最佳解收斂的關鍵影響因子，因此在使用上表達的優劣，決定是否能搜尋成功的關鍵。

5. 粒子群法

由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出，同 GA 一樣以群體為基礎所發展的一種最佳化演算法，不過，並不考慮交配和突變運算元。模擬鳥群或魚群在空間中覓食的社會行為。

搜尋策略：將個體視為粒子，一開始隨機產生各粒子的初始位置和初始速度；計算出表示各粒子適應力的函數值；接著每顆粒子會依本身經驗與直覺，在範圍空間內移動至覺得較佳的位置，即產生修正的速度與對應位置，比較函數值是否比當前好；當群體中有更佳的函數值時，粒子之間會相互溝通，並引導各粒子漸漸地往當前所謂的全體最佳解移動；依此方式不斷產生新的位置和速度直到滿足終止條件為止。

方法特性：考慮當前解的資訊；適用領域相當廣，大多情況下比 GA 收斂快；各粒子擁有各自的記憶與判斷力；屬於區域與全域共同評估的搜尋法。

6. 和弦搜尋演算法

2001 年由 Geem 等人所提出發表，為一種啟發式演算法進化版，發展至今已有 10 年之久。此方法模擬音樂家們使用不同樂器一起即興演奏下，每位音樂家各自記憶所彈奏的曲調，並藉由每次合奏後來調音，因此，經過數次的即興演奏後所演奏的音樂會越來越和諧、越美妙，依此種方式產生的最佳演奏概念來求解，稱和弦搜尋演算法，如圖 2.4。

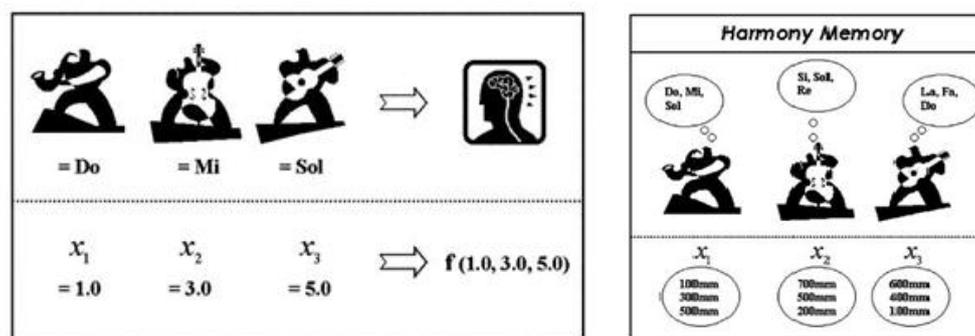


圖 2.4 HS 模擬與設計變數對照圖(Lee & Geem, 2005)

Geem (2010)說明最先進的HS演算法架主要分成7大步驟：

步驟 1: 問題公式化(problem formulation)

步驟 2: 參數設定(algorithm parameter setting)

步驟 3: 隨機產生初始記憶(random tuning for memory initialization)

步驟 4: 改善和弦: 隨機選取、考慮記憶與調音 (harmony improvisation : random selection, memory consideration, and pitch

adjustment)

步驟 5: 記憶更新(memory update)

步驟 6: 滿足終止目標(performing termination)

步驟 7: 終曲(cadenza)

一開始將問題以數學模式表示，即公式化；接著給定參數值或相關參數設定後；以完全隨機模式產生一組解(和弦)作為初始和弦記憶向量(HM)，以上(步驟 1~3)歸類為問題的初始化；接下來(步驟 4~6)為問題的搜尋方式，考慮參數機率(HMCR、PAR、bw)關係後隨機產生一個解(和弦)；此新產生的和弦若是比 HM 中任一個好，則剔除最差者並取代之；接著一直重複步驟 4、5 直至達終止目標為止。步驟 7 類似樂曲接近結尾的一段裝飾奏，將最佳解(和弦)再做一次演奏或修飾後來收尾。演算法完整流程表示如圖 2.5。其中，和弦搜尋演算法所使用的主要參數有兩個：和弦記憶比率(Harmony Memory Considering Rate, HMCR)與調整比率(Pitch Adjusting Rate, PAR)，並以兩者參數關係來改善最佳化搜尋，如圖 2.6。

方法特性：離散、連續或不連續變數均能使用；不用給定初始值；較不受區域性限制；原理簡單，使用容易；搜尋解的量不會因變數量增加而大幅度上升。

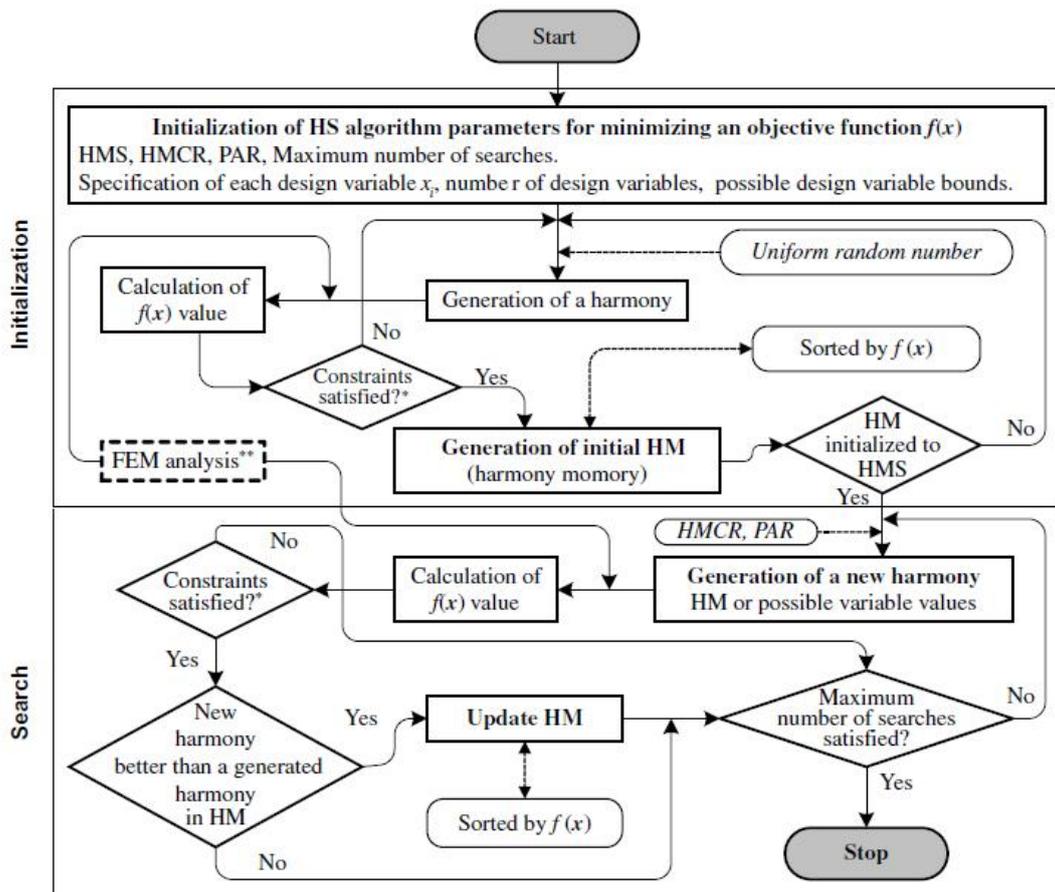


圖 2.5 和弦搜尋最佳化演算法流程圖(Lee & Geem, 2005)

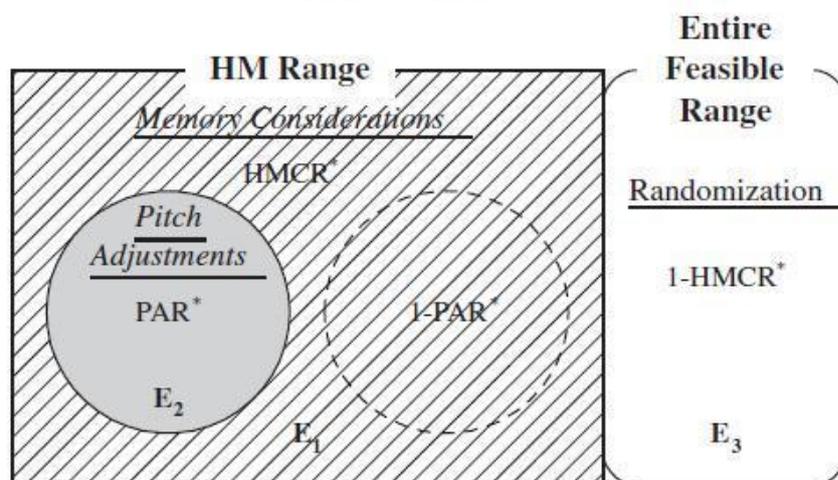


圖 2.6 新和弦產生之概念(修自 Lee 和 Geem, 2005)

Lee 和 Geem (2005)將啟發式演算法依模擬自然現象的不同而分類如下，並參考整理如圖 2.7：

1. 生物演化過程：以達爾文進化論為基礎來模擬遺傳或繁衍後代的現象。以常見的基因演算法說明，主要分以下三種運算子：繁殖、交配、突變。其相關演算法比較整理如表 2.2。

表 2.2 生物演化之比較

[與 GA 之比較]	同	異
演化策略	以選擇機制和突變為運算子	無交配運算子 以浮點向量來運算，非二進制。
進化編程	以選擇和突變為運算子	無交配運算子 選擇過程屬於隨機競賽
基因編程	概念相同	以程式語言來表示解，非字元字符串。
粒子群	以群體為基礎的最佳化演算法	無交配和突變運算子
PMBGA 或 EDA	程序相似	以機率取樣方式替換舊有的解

2. 動物行為：以設計參數模擬有記憶的搜尋能力。如：禁忌搜尋與和弦搜尋。

(1) 禁忌搜尋

將以往蒐尋過不要的結果記錄下來，避免下次重複得解。

主要參數：取向 (Aspiration) 和多樣性 (Diversification)。

(2) 和弦搜尋

模擬音樂家們以不同樂器合奏曲子時，是如何慢慢修改音

符並一同演奏才會產生最和諧音律的調音概念。主要設計參數：
和弦記憶比率和調音比率。

3. 物質提煉過程：模擬粒子高溫隨時間冷卻達平衡狀態。如：模擬退火，物質若在高溫熔化時，其分子排列方式為隨機分散，以降溫過程控制分子排列的一種物理現象。

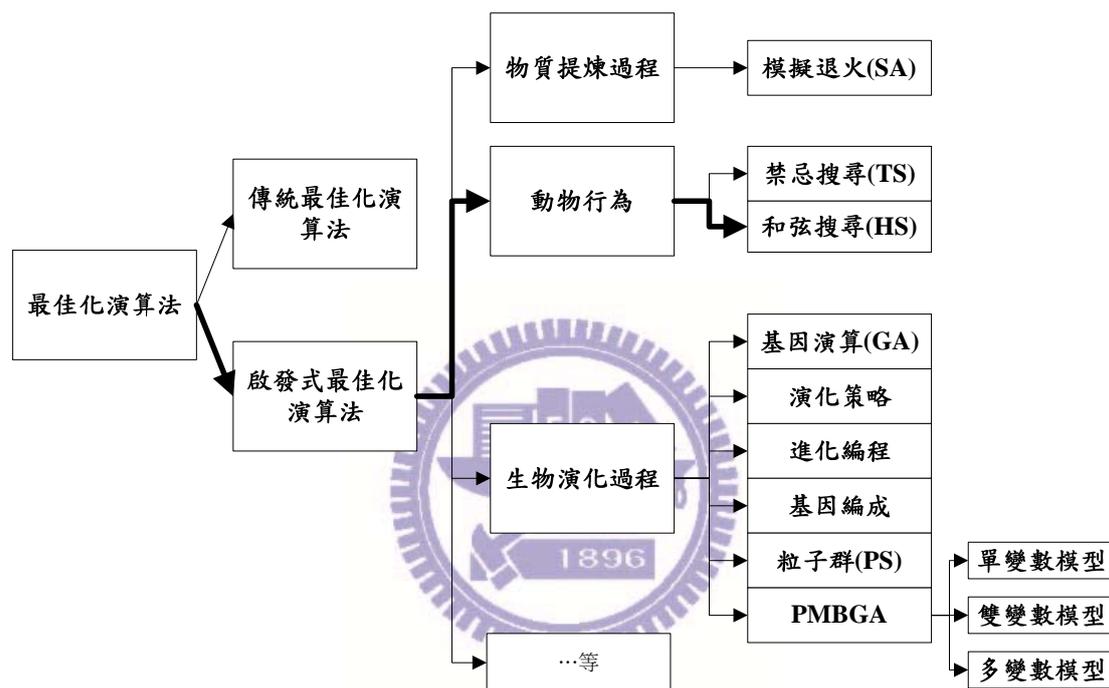


圖 2.7 啟發式最佳化演算法依模擬現象不同分類

啟發式最佳化演算法除了上述的方法外，尚有許多其他演算法，如：Bee Algorithms(BA)、Firefly Algorithms(FA)...等，而這些方法共同的求解概念可以簡單分為兩種：第一種是在問題模式的範圍內隨機搜尋，滿足全域性的搜尋；第二種為在下次迭代中，會考慮先前比較好的結果，達到最佳求解的收斂效果。

Yang (2009) 提到 Meta-heuristic 是 Heuristic 的進化版，主要組成元素：Intensification 與 Diversification 比較如表 2.3。而此兩元素權重對於求解的優劣效率有相當重要性。整理幾個常見的最佳化演算法(SA、ACO、PSO、FA、HS) 比較 Intensification 與 Diversification 之主控參數與說明如表 2.4。

表 2.3 Intensification 與 Diversification 之比較

比較	譯	喻	域	解	率
Intensification	加強版	開發	局部	收斂	快
Diversification	多樣化	探測	整體	發散	慢

表 2.4 Intensification 與 Diversification 主控參數與 5 個演算法說明

	控制參數	Intensification	Diversification
SA	溫度	趨近設定低溫	高溫高能狀態
ACO	費洛蒙濃度、蒸發率	螞蟻分泌費洛蒙，依濃度選擇路徑機率	隨機行走
PSO	位置、速度	粒子本身經驗與群體判斷	隨機排列
FA	距離	螢火蟲發光相互吸引	隨機飛行
HS	記憶率、調音率	音樂家記憶(寫譜)	隨機的機率取樣

2.3.2 啟發式最佳化演算法應用之相關研究

啟發式最佳化演算法於工程上的應用範圍相當廣泛，Geem(2010)

以 HS 演算法應用於各學科或工程最佳化問題，分成六大類：

1. 真實世界的應用
2. 電腦科學問題
3. 電子工程問題
4. 土木工程問題
5. 機械工程問題
6. 生物醫學應用



然而，在這些不同工程領域問題中，有些問題型態求解目的之應用雷同，如：電子晶片線路配置、運輸路線、水域網路等路線規劃問題；結構設計成本考量問題；土壤邊坡穩定分析 FOS 問題；熱量與能量之間的轉換關係等應用。因此將一些常見的啟發式最佳化演算法相關文獻之應用分類如下：

1. 線路規劃問題

- (1) Gendreau 等人(1994)、Gendreau 等人(1999)，以 TS 應用於交通路線問題。
- (2) Chang 和 Ramakrishna(2002)，將 GA 應用於最短路徑之問題。

- (3) Rajendran 和 Ziegler(2004)、Bell 和 McMullen(2004)，以 ACO 應用於物流等交通路線規劃問題。
- (4) Dell'Amico 和 Trubian(1993)，以 TS 用於加工廠規劃問題。
- (5) van Laarhoven 等人(1992)，以 SA 應用在加工廠規劃問題。
- (6) Nakano 和 Yamada(1999)，將 GA 應用在加工廠規劃問題。
- (7) Abido(2000)，以 SA 應用於多穩壓器設計問題。
- (8) Park 等人(2005)、Abido(2002)，以 PSO 應用於電力系統經濟調度問題。
- (9) Chiang(2005)，將 GA 應用於電力經濟調度問題。
- (10) Maier 等人(2003)，主要以 ACO 應用於水源供應管線問題。
- (11) Geem 等人(2009)，整理各種不同最佳演算法，與 HS 比較於水域網設計、多區壩規劃、流體路線參數濾定問題上。

2. 結構設計問題

- (1) Camp 等人(1998)，以 GA 應用於二維結構設計問題上。
- (2) Saka(2010)，以 HS 應用於數個鋼構最佳化設計問題。
- (3) Xu 等人(2010)，運用 HS 設計電動機器最佳化原型，使其可在軟弱地面活動。

3. 邊坡穩定分析 FOS 問題

(1) Cheng 等人 (2007a)對一些最佳化求解法與 PSO 和 MPSO

做比較，此外發展出 MPSO 以修正 PSO 終止目標函數，使搜尋目標函數數量(NOF)少很多，並以邊坡穩定例子由簡入深驗證 PSO 和 MPSO，均適用且能有效自動定位出邊坡破壞滑動面。

(2) Cheng(2009)，以 HS 發展出兩種更新的 NHS1 與 NHS2 方法，

主要引入了 GA 概念：配對模式、一次迭代過程產生數解、適者生存的機率取樣，應用於邊坡穩定問題，以求安全係數最小之破壞滑動面。

4. 影像處理問題

(1) Svergun(1999)，使用 SA 於生物分子構造解析問題上。

(2) Wachowiak 等人(2004)，利用 PSO 處理生物醫學影像問題。

5. 其他

(1) Kariuki 等人(1997)，將 GA 應用於化學結晶構造上。

(2) Abbaspour 等人(2001)，將 ACO 用在估計不飽和土壤水力參數之問題。

(3) Ayvaz(2009)，用 HS 於地下水參數構造鑑定問題。

- (4) Ceylan 和 Ceylan(2009), 整理數個 HS 文獻應用於能量傳輸需求之研究問題上, 主要分成線性、指數和二次之問題模式。
- (5) Alexandre 等人(2009), 以 HS 應用於助聽器選擇音色分辨之問題, 並與隨機搜尋法比較之結果顯示 HS 誤差率較小。
- (6) Panchal(2009), 將 HS 應用於醫學物理領域之放射性短程療法, 其模擬時間比 GA 快許多。

6. 綜合應用

- (1) Lee 和 Geem (2005) 蒐集許多學者的研究, 並配合其發展的 HS 方法, 以傳統數值和啟發性的最佳化演算法對數種工程上的應用做比較說明。
- (2) Ingram 和 Zhang (2009) 蒐集 2000 年至 2008 年間關於 HS 一系列文獻依工程應用領域上不同做整理並歸納相關的修正版或與其他最佳化方法結合之相關表格與年代表, 以便使用者參考用。
- (3) Mahdavi(2009), 將 HS 應用於 NP-Complete 問題, 如: 數讀、運輸路線、音樂作曲等最佳化問題, 並與一些啟發式演算法比較後, 認為 HS 對於各種最佳化問題求解效能是相當有潛能的。

(4) Fesanghary(2009)，以 HS 應用於熱力系統、經濟電力調度、零件製造之化學、機械、電子工程的成本問題，並與 GA 等演算法比較，結果顯示 HS 之使用上相對簡單、電腦計算效率佳、使用參數少的情況下，就能處理工程上複雜的最佳化問題。

(5) Fesanghary(2010)，整理不同文獻的最佳化法，如：GA、HS、IHS、PSO、近似法、簡化法等，應用於三種例子說明混合 HS-SQP 法收斂效能佳，其中有焊接樑設計、經濟調度和熱轉換網域之最佳化問題。



傳統與啟發式演算法在工程最佳化問題的應用性，已有不少學者對此做詳細研究，此外，有些學者嘗試提出一些方法來改善或修正原有演算法，以增加各方法在工程應用上之適用性與多樣化。除了以上整理的文獻外，尚有一些相關文獻如下：

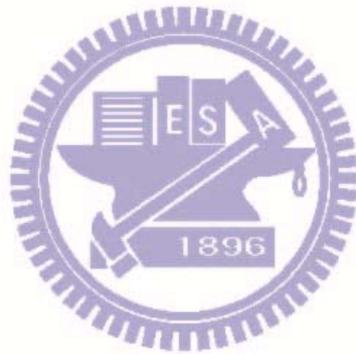
1. Mahdavi 等人 (2006) 針對 HS 搜尋過程之調音參數(PAR、bw)做動態修改，並以例子比較和驗證其有效性。
2. Cheng 等人(2007b) 選出 6 個常見的最佳化方法對應用於邊坡穩定分析問題深淺適用性做比較—SA、GA、PSO、HM (SHM、MHM)、TS 與 ACO，如表 2.5。

表 2.5 六個常見最佳化方法適用性比較

問題複雜性	適用方法
一般~簡單(變數 <20)	每種方法都適用，以 HS 和 GA 最有效。TS 和 ACO 視問題而定。
一般~簡單(變數 >20)	MHM 和 PSO，求解時間不因問題複雜程度不同而太大變化。
更複雜或大量變數	PSO。
有軟弱薄層	PSO。
特殊作用情況	收斂較易失敗，SA 和 PSO。

3. Gao 等人(2009)提出兩個修正 HS 方法，可用來處理多模式型態和限制性之最佳化問題。第一種是以魚群演算法為靈感來使用 HM 處理多重模式型態之問題；第二種則是直接處理限制條件，最後以相關例子來模擬並驗證此兩種修正方法。
4. Jiang 等人(2010)，結合 HS 之特色用以改善 SA 退火速度，主要方式是將 HS 所產生的新解，當作 SA 之初始條件狀態去搜尋，並以一些常見的最佳化數學式測試，結果顯示改善後的 SA 收斂速度比原始 SA 和其他演算法快。
5. Mukhopadhyay 等人(2008)以統計分析方式推導並證明母體變異數(Population-variance)與 HS 搜尋解之性能，並做一些參數探討。

6. Wang 和 Huang(2010)，說明 HS 應用範圍相當廣泛，但有些困難之處在於如何選擇適當的參數值，因此用一些數學技巧使參數值也能有經驗性的隨迭代過程變化，並與原始 HS 和一些改良的 HS 方法比較，其結果是更好的。



2.4 小結

前一節中提到各種啟發式最佳化演算法，在工程上的應用領域相當廣泛，但是問題特性方面應用有些侷限，因此有部分文獻提到未來研究重點會放在其他更多的領域面上或是處理更真實的最佳化問題，特別是針對如何將這些最佳化演算法與其他工程技術做結合，如：Web、API、GUI 和 GIS 等，運用界面的方式使資料能夠互相溝通與進行分享。假若在此方面的技術能有所提升，相信對於未來研究最佳化之實際應用性能向前邁進一大步。



本研究題材為土石壩滲流最佳化問題，依問題特性所考慮的變數量小於 10 個，且為連續或離散變數之問題；再進一步考慮這些變數值是有限制範圍的，且在進行滲流分析時，也會有隱式限制條件包含在內，難以表示出來；另外，問題之最佳化目標是利用已知之量測或觀測數據，與計算值做比較，因此屬於多目標之問題型態。又為了能夠有效配合滲流分析軟體進行模擬，因此本研究最後乃選擇「原理簡單，使用容易」之和弦搜尋演算法(HS)作為本研究之最佳化演算法。

第三章 研究方法

由文獻可知，做任何求解或分析問題之前，必須先清楚瞭解整個問題的規模與特性，和希望達到的目標與容許的精度範圍，方能選擇適當求解方法。3.1 節先說明本研究的最佳化問題型態；3.2 節選擇最佳化方法與輔助程式；3.3 節擬定最佳化流程；3.4 節則說明研究案例模擬之策略與規劃。

3.1 最佳化問題型態

本研究目的即是希望藉由最佳化程序來解決土石壩滲流相關問題，並且配合現有軟體以實踐之。最佳化問題型態流程表示為圖 3.1。

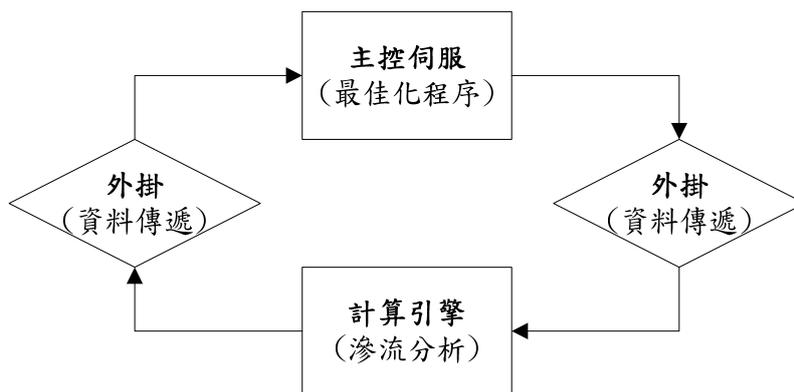


圖 3.1 執行最佳化問題型態流程圖

本研究之最佳化研究對象為土石壩滲流問題，如圖 3.2；最佳化的目的是希望由現有的設計文獻、實驗數據或監測資料，模擬土石壩可能的滲流情形，比如：各材料參數、庫水位之邊界條件、水位井之水位或水壓、浸潤面分布、高透水路徑規劃、壩體滲流量…等；再由此選擇關鍵因子作為最佳化設計變數；最後再建立整個最佳化數學模式，即目標函數與相關條件給定。

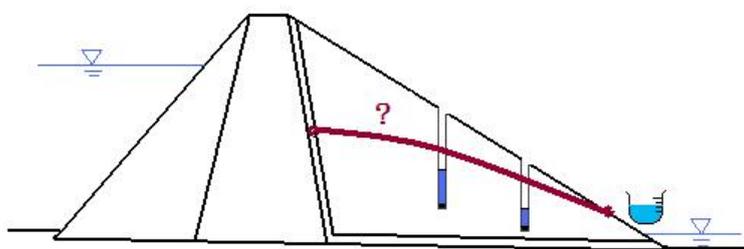


圖 3.2 土石壩相關滲流問題示意圖

本研究重點在於如何將工程問題與最佳化流程做結合。假若選擇市面上一種最佳化軟體，則需考慮如何設計滲流問題之程式撰寫，這在執行上有相當的難度；另外，若單純使用現有的滲流分析軟體進行最佳化演算，可能要修改原始程式碼，其使用上也相當不容易。因此，考慮執行上的可行性，最後決定個別選用一套軟體，分別進行最佳化程序與滲流分析之計算，作為研究輔助工具。

自動化執行最佳化搜尋模式的首要問題就是如何將兩種不同軟體做結合，在這邊則是使用資料傳遞方式作為兩套軟體的溝通橋樑。

步驟簡單說明如下：

步驟 1：將土石壩滲流問題所考慮的關鍵因子視為設計變數；

步驟 2：由最佳化程序隨機產生初始設計值，並輸出至外部檔案進行資料儲存；

步驟 3：接著啟動計算引擎，自動執行並讀取外部檔案進行滲流分析計算，並將分析結果輸出至外部檔案儲存；

步驟 4：待計算結束後，主控程式會讀取分析結果的檔案，進行設計值的計算，也就是求得初始目標函數值；

步驟 5：考慮計算函數值，再由最佳化程序繼續產生設計值，重複步驟 2 到步驟 4，直到滿足最佳化演算之終止目標為止。

3.2 電腦輔助程式與最佳化方法選擇

求解最佳化演算計算過程一般選用一種電腦程式(如: Fortran、C++、MATLAB 等程式)作為輔助撰寫使用。然而,考慮滲流分析上之便利性與可行性,因此嘗試選用滲流分析軟體(如:FLAC、GTS...等)作為輔助計算用,並配合最佳化演算法程式撰寫以搜尋並推算出可能最佳解。以下簡單介紹本研究所選擇的主控程式為 MATLAB,執行最佳化演算法,並結合 FLAC v4.0 有限差分軟體進行滲流分析之模擬,最後,由可能面臨的最佳化問題規模與軟體的執行效能,選用一種啟發式的和弦搜尋演算法作為本研究之工程最佳化求解法。



3.2.1 MATLAB (MATrix LABoratory 的簡稱)

MATLAB 是功能強大的數學運算軟體,也是一套專為工程和計算所設計的高效率電腦計算軟體。在科學計算程式設計上的優勢有:容易使用、平台獨立性、預設函式與特別功能的工具箱、和裝置無關的繪圖、使用者圖形介面、MATLAB 編譯器等優點。其中選用 MATLAB 為執行程式主要原因之一為:其具有獨立的 MATLAB 編譯器,此編譯方式可將原始 MATLAB 程式轉成獨立的執行檔。

3.2.2 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)

FLAC為美國Itasca Consulting Group, Inc.為大地工程及開挖工程所發展的一套數值分析軟體，採用顯式有限差分法求解，可應用在大地工程中基礎、邊坡穩定、隧道、水利工程、地質鑽孔、堤壩滲流或地震分析等相關問題。FLAC應用於滲流方面問題上，能模擬流體在可滲透性介質中流動，除了可單獨模擬流動外也可與力學模式進行模擬，以表達流體-固體相互作用等情形。此外，此軟體可依使用者需要，選擇在指令視窗的驅動模式下或圖形介面驅動模式下執行，因此，本研究選擇FLAC為本研究執行滲流分析計算引擎。

3.2.3 最佳化演算法的選擇

本研究採用和弦搜尋演算法(HS)最佳化方法之原因如下：

1. 原理簡單，使用容易；
2. 對於變數為連續、不連續或離散型均適用；
3. 搜尋次數不會因變數量增加而成指數增加；
4. 滲流方面之最佳化問題，本研究所考慮的變數量小於 10 個，由文獻回顧中提到的 Cheng(2007b)指出，變數量小於 20 個，以 HS 和基因演算法(GA)最有效。並且考慮執行滲流分析為一次計算一個設計值，因此選用和弦搜尋演算法為本研究最佳化演算之方法。

3.3 最佳化流程擬定

本研究所擬定之最佳化流程可分兩部分來敘述：3.3.1 節先介紹最佳化演算法擬定模擬對象之背景 - 鯉魚潭壩與新山壩；3.3.2 節介紹後續和弦搜尋最佳化演算法之詳細流程。本研究先藉鯉魚潭壩與新山壩兩座材料分區明顯不同之土石壩，以驗證最佳化演算採用之方法，接著說明本研究為何選擇新山土石壩作為主要研究案例之對象，並簡單介紹背景基本資料與本研究之所選定之斷面，提供後續最佳化流程中演算分析之資料依據。

3.3.1 鯉魚潭與新山土石壩之簡介與斷面選定

鯉魚潭水庫

鯉魚潭水庫於民國81年完工，位於苗栗縣三義鄉內，壩址在大安溪支流景山溪狹窄之河谷上，集水面積總計53.45 平方公里，包括苗栗縣三義、大湖、卓蘭等三個主要鄉鎮。鯉魚潭水庫主要是供應台中市、苗栗等地區之民生、工業與農業用水。壩高96 m (標高由210 m 至306 m)，滿水位標高300m，壩頂長度235m，壩頂寬為10m，兼具公共給水、灌溉、發電及觀光等多目標水庫。圖3.3為鯉魚潭大壩標準斷面圖。



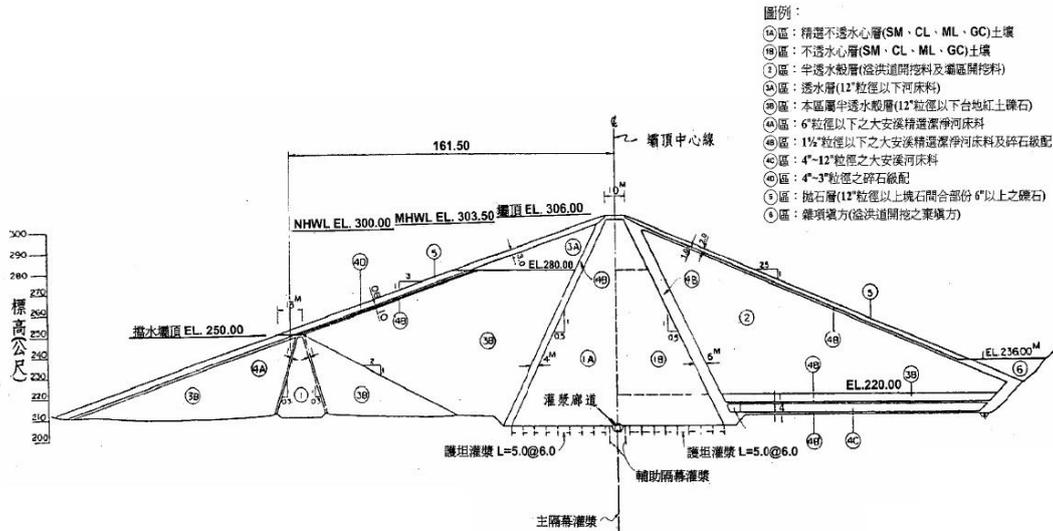


圖 3.3 鯉魚潭大壩標準斷面圖(經濟部水利署中區水資源局，2007)

鯉魚潭壩型屬於中央直立心層滾壓土石壩，且壩型分布對稱，為目前常見之大壩類型。FLAC為二維數值分析軟體，因此取鯉魚潭壩之中段面為模擬斷面，圖3.3(左側)上游小型堤壩主要為大壩施工前期用以檔水等用途，對於整體大壩之滲流分析影響性甚小，並參考陳冠亨(2006)將壩體各材料簡化為心層(core)、殼層(shell)與濾層(filter)再加上基礎(foundation)後，作為本研究驗證之模擬斷面，如圖3.4；鯉魚潭水庫模擬庫水位為EL.285m；此外各材料參數設定參考陳冠亨(2006)以實際壩體總滲流量進行逆推分析之結果，鯉魚潭壩體材料之透水係數調整如表3.1。壩體邊界以施加孔隙水壓方式表示上游庫水位與下游殼層趾部排水之區域，以此形成水頭差進行穩態滲流分析。初步分析之飽和度圖與滲流量結果，如圖3.5與表3.2。



圖 3.4 鯉魚潭壩體材料分區(陳冠亨，2006)

表 3.1 鯉魚潭壩體材料之透水係數 (單位:cm/sec)

材料分區		心層	殼層	濾層	基礎
透水係數	kh	4×10^{-7}	5×10^{-5}	2.5×10^{-3}	1×10^{-5}
	kv	1×10^{-7}			

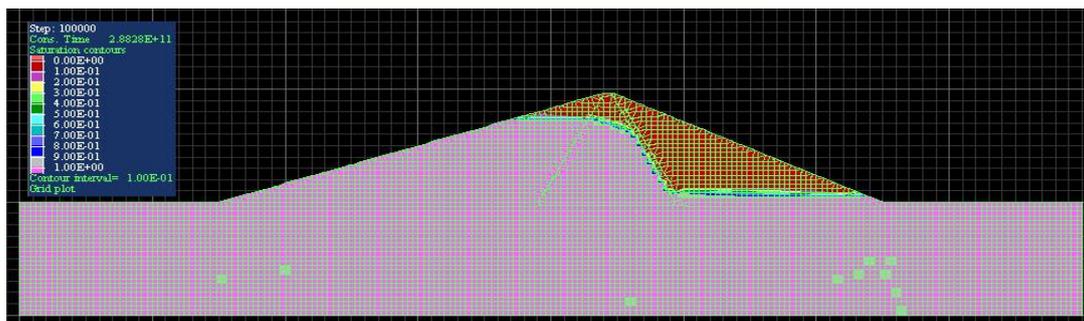


圖 3.5 鯉魚潭壩網格建立(1 網格尺寸為 4m×4m)與初步分析之飽和度圖

表 3.2 FLAC 初步模擬鯉魚潭大壩之相關資料

蓄水位高程 (m)	單位長度滲流量 (cms/m)	總滲流量 (CMD)
EL.285m	7.148×10^{-6}	88.93

※總滲流量(m³/day)=單位長度滲流量(m³/sec/m)×土壩平均總長度(144m)×86400

新山水庫

新山壩於民國 69 年完工，建於基隆市安樂區，為單一供應基隆與汐止地區用水，於民國 87 年完成壩體加高工程，集水面積為 1.6 平方公里，壩高 51m 加高至 66m，壩軸最長為 262m，壩頂標高由 EL.75m 升至 EL.90m，主要期望蓄水量可由 400 萬噸增加為 1000 萬噸。圖 3.6 為新山水庫俯視圖。圖 3.7 為新山壩 Sta.0+195.29 橫斷面圖，紅框為築高段。



圖 3.6 新山水庫俯視圖(Google 地球)

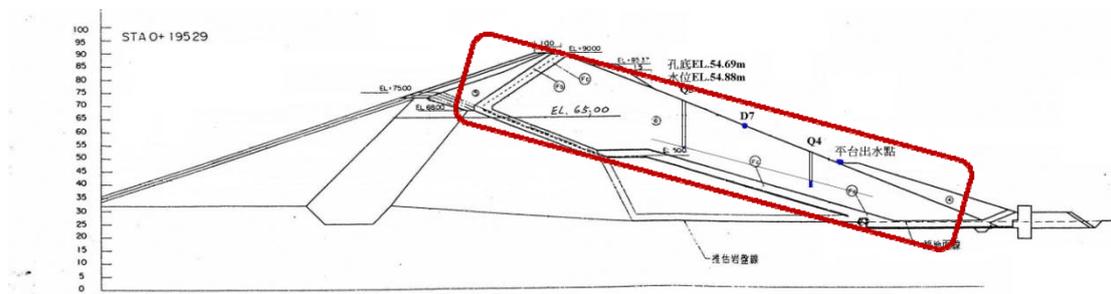


圖 3.7 新山大壩 Sta.0+195.29 橫斷面圖(改繪自 國立交通大學,2010)

由圖 3.7 可看出，加高部分直接築於原有的壩體上，致使心層為傾斜設計，濾層也隨之變成特別的〈型，因此，新山壩為一典型不對稱型土石壩。陳冠亨(2006)蒐集國內、外關於土石壩破壞案例或文獻做整理，主要有壩頂溢流造成壩體侵蝕、管湧或滲漏造成之壩體侵蝕或集中滲流、邊坡滑動、地震、沉陷…等破壞模式，由此可知壩體滲漏問題對土石壩穩定有其重要性。此外，由國立交通大學(2010)報告指出，整理新山水庫過去滲漏文獻，並施作非破壞性檢測資料與數值模擬的結果做整合推估，壩面異常滲漏可能因壩體內存在特定滲流路徑或受限於濾層排水效能等情形而生，以致新山壩目前最高庫水位仍停留在 EL.83m 左右。因此，本研究選用新山壩為滲流分析研究對象。



考慮 FLAC 為二維數值分析軟體，需要選擇新山壩其中之一斷面為研究滲流分析與建模參考圖使用。先參考圖 3.8 為新山壩俯視圖，其中紅色數字為水位觀測井長期監測之水位資料；黃色區塊表示有長期蒐集到滲漏水之位置；藍色箭頭方向表示壩體水流方向，且幾乎與壩軸成垂直關係。另由紅色箭頭所指的 Sta.0k+170.68 表示此斷面附近之壩體，如圖 3.9 示，對照出此斷面平台出水高程為 EL.46m，明顯高於由水位觀測井(L1、L2、L3)繪製之浸潤面高程。

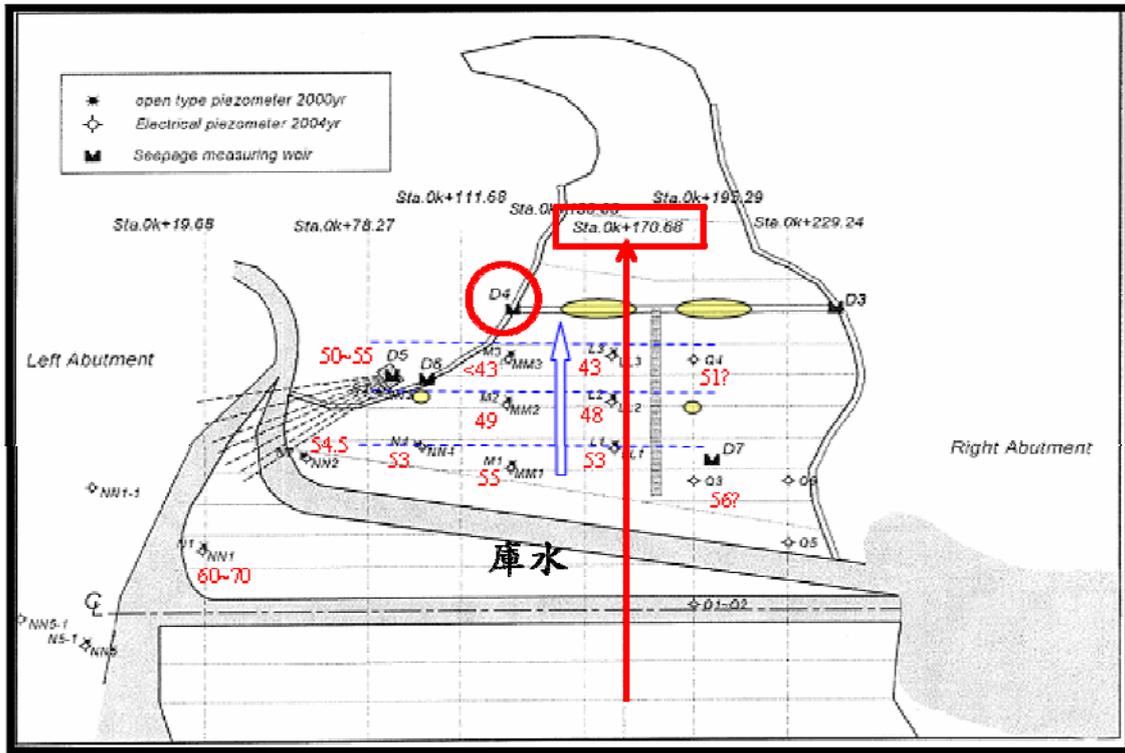


圖 3.8 新山壩俯視圖(改繪自 國立交通大學，2010)

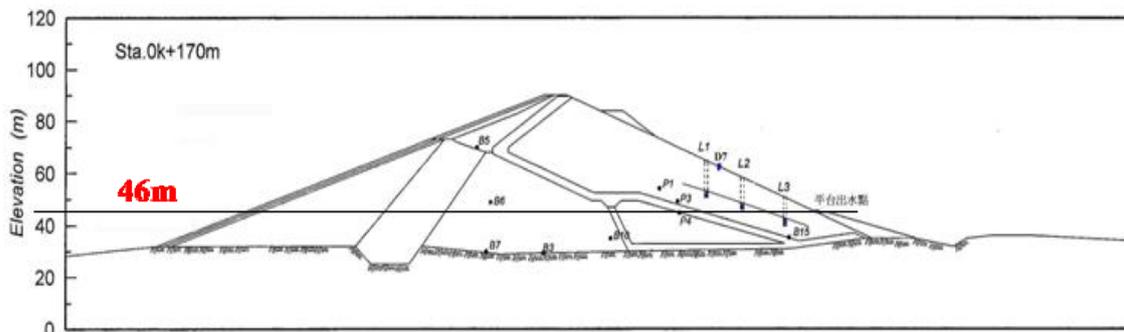


圖 3.9 新山壩 Sta.0k+170m 斷面圖(改繪自 國立交通大學，2010)

然而，再考慮圖 3.8 上所標誌之紅色圓圈，因平台左右高差關係，D4 量水堰所蒐集到之平台滲出水為壩體左側，即 Sta.0k+170m 附近之出滲水，其排除降雨影響之長期監測資料如圖 3.10，庫水位 EL.82m 時之滲水量約 0.5CMD。圖 3.11(D1 為加高前；D2 為加高後；括弧

內之人工，表示監測數據以人工方式量測)總壩體滲水量與庫水位關係圖，一樣為排除降雨影響之長期監測資料，其中庫水位接近 82m 有幾筆數據接近 0 或超過 350 CMD，應屬人為擷取數據之誤差。

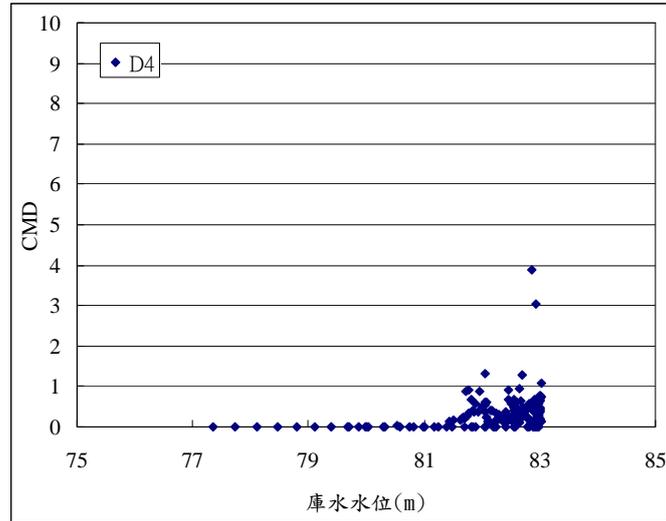


圖 3.10 D4 量水堰排除降雨影響之滲水量與庫水位關係圖(國立交通大學，2010)

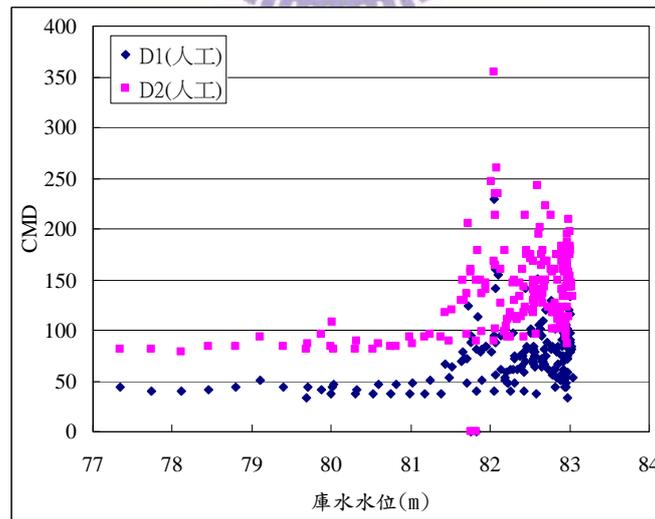


圖 3.11 排除降雨影響之壩體總滲水量與庫水位關係圖(國立交通大學，2010)



圖 3.12 新山水庫滲漏位置圖(陳冠亨，2006)

選用新山壩 Sta.0+170m 作為研究模擬對象原因說明如下：

1. 有詳細設計圖可供 FLAC 建模使用；
2. 平台處有異常滲出水現象，與長期監測數據；
3. 在此斷面附近 5m 內有 3 孔水位觀測井之水位資料可供參考；
4. 此斷面雖然不是新山壩最大斷面，不過仍屬於次大之斷面，可足

以用來表示此壩體內部幾何關係。

圖3.13為新山壩斷面各材料透水係數分布圖，由國立交通大學(2010)參考自Peng 等人(2008)之底圖與中興工程顧問股份有限公司(2008)之壩材透水係數來源(經透水試驗獲得)，其中括弧參考自捷儀工程顧問(股)公司(2004)之工程地質鑽探報告書之試驗結果。

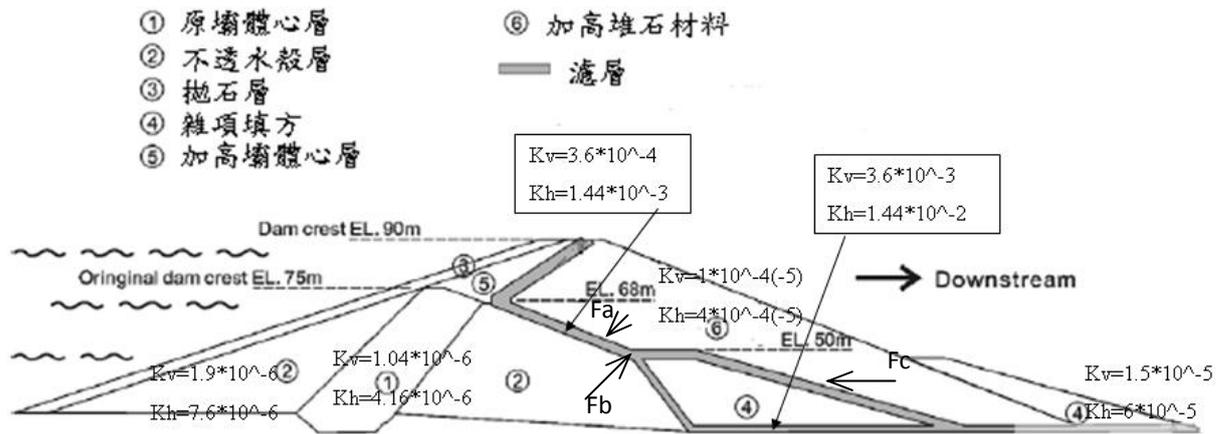


圖 3.13 新山壩斷面各材料透水係數分布圖(單位:cm/sec)(國立交通大學, 2010)

因此，FLAC 網格建模參考新山壩 Sta.0+170m 去設計；材料參數使用參考國立交通大學(2010)數值模擬之參數，並以總壩體滲流量逆推各材料滲透係數；此外，考慮壩體內部可能存有高透水通道，其透水係數參考國立交通大學(2010)示蹤劑施放結果 ($1.6 \times 10^{-2} \sim 5.4 \times 10^{-2}$ cm/sec)；並考慮示蹤劑施放當時之庫水位監測數據為 EL.82m，因此以庫水位 EL.82m 作為上游殼層之邊界，而下游壩趾出水處也施加 4 m 高之水位，以造成水壓差；本研究不考慮庫水位急速升降情形，因此以水壓變化與時間無關之穩態模式進行滲流分析。FLAC 初步建模與各材料透水係數如圖 3.14；飽和度與網格表示如圖 3.15；局部放

大壩材與水位觀測井分佈如圖 3.16(黃色為井口；藍色為水位所在網格；黑色為水位(壓)計埋設所在網格)；初步分析結果等資料如表

3.3。

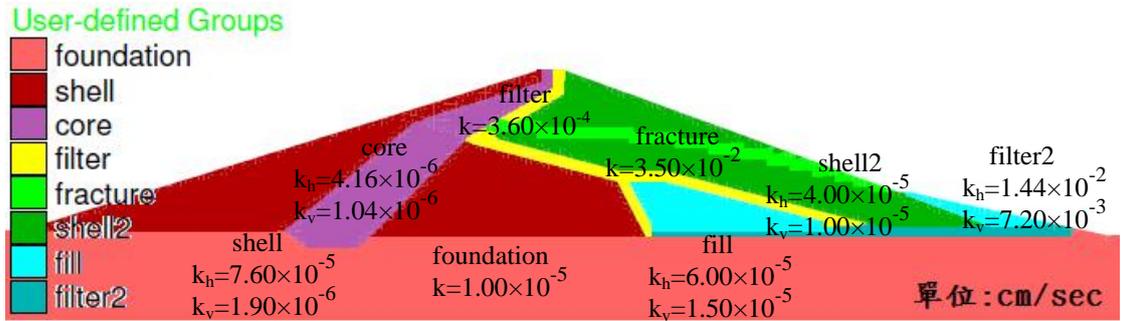


圖 3.14 FLAC 模擬新山壩 Sta.0+170m 與材料參數圖

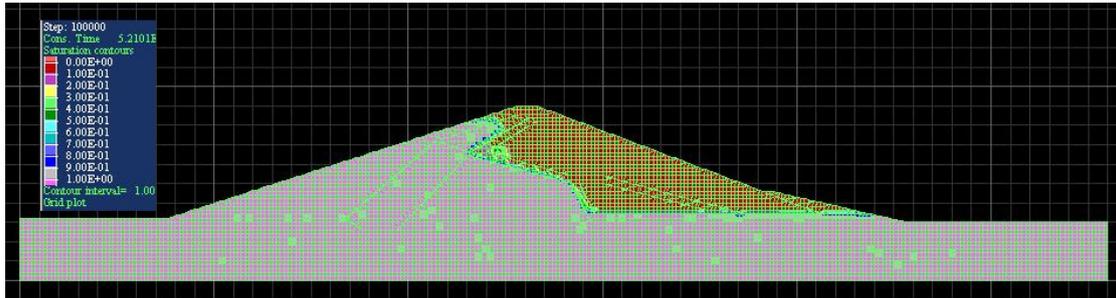


圖 3.15 FLAC 網格建立(1 網格尺寸為 2m×2m)與初步分析飽和度圖

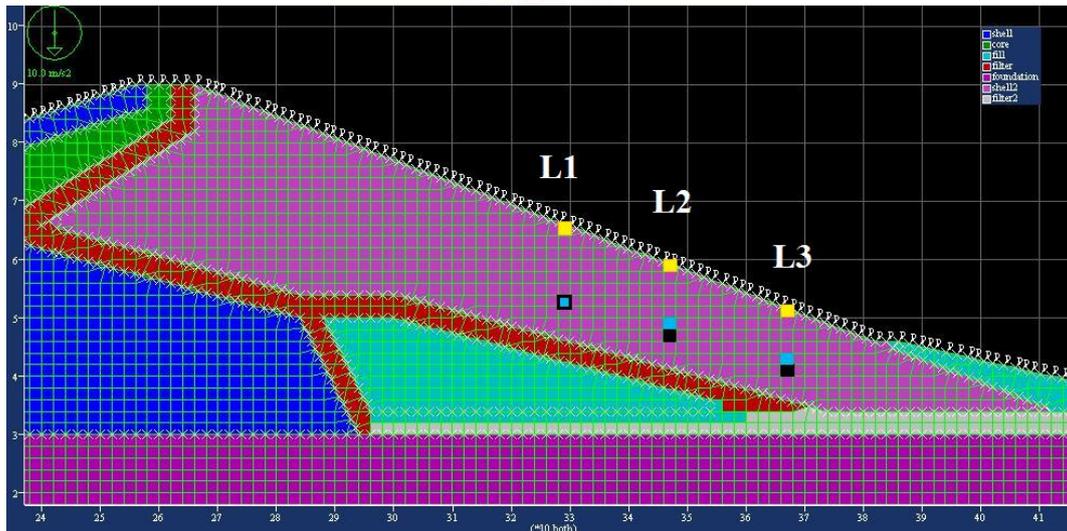


圖 3.16 水位觀測井對應於下游殼層位置圖

表 3.3 FLAC 初步模擬新山壩之相關資料

斷面	蓄水位高程 (m)	單位長度滲流量 (cms/m)	總滲流量(CMD)
Sta.0+170m	EL.82m	6.629×10^{-6}	114.55

※總滲流量(m³/day)=單位長度滲流量(m³/sec/m)×土壩平均總長度(200m)×86400

※單位壩長滲流量(m³/day/m)=單位長度滲流量(m³/sec/m)×86400

3.3.2 和弦搜尋最佳化演算流程之擬定

和弦搜尋最佳化流程擬定，簡單分成以下 6 大步驟，並表示為

圖 3.17：

步驟 1：問題數學化；

步驟 2：定義各參數值；

步驟 3：產生 1 組初始和弦記憶(HM)；

步驟 4：一次迭代產生 1 個新的和弦(H)；

步驟 5：是否更新 HM；

步驟 6：重複步驟 4 和步驟 5，直到達終止目標為止。



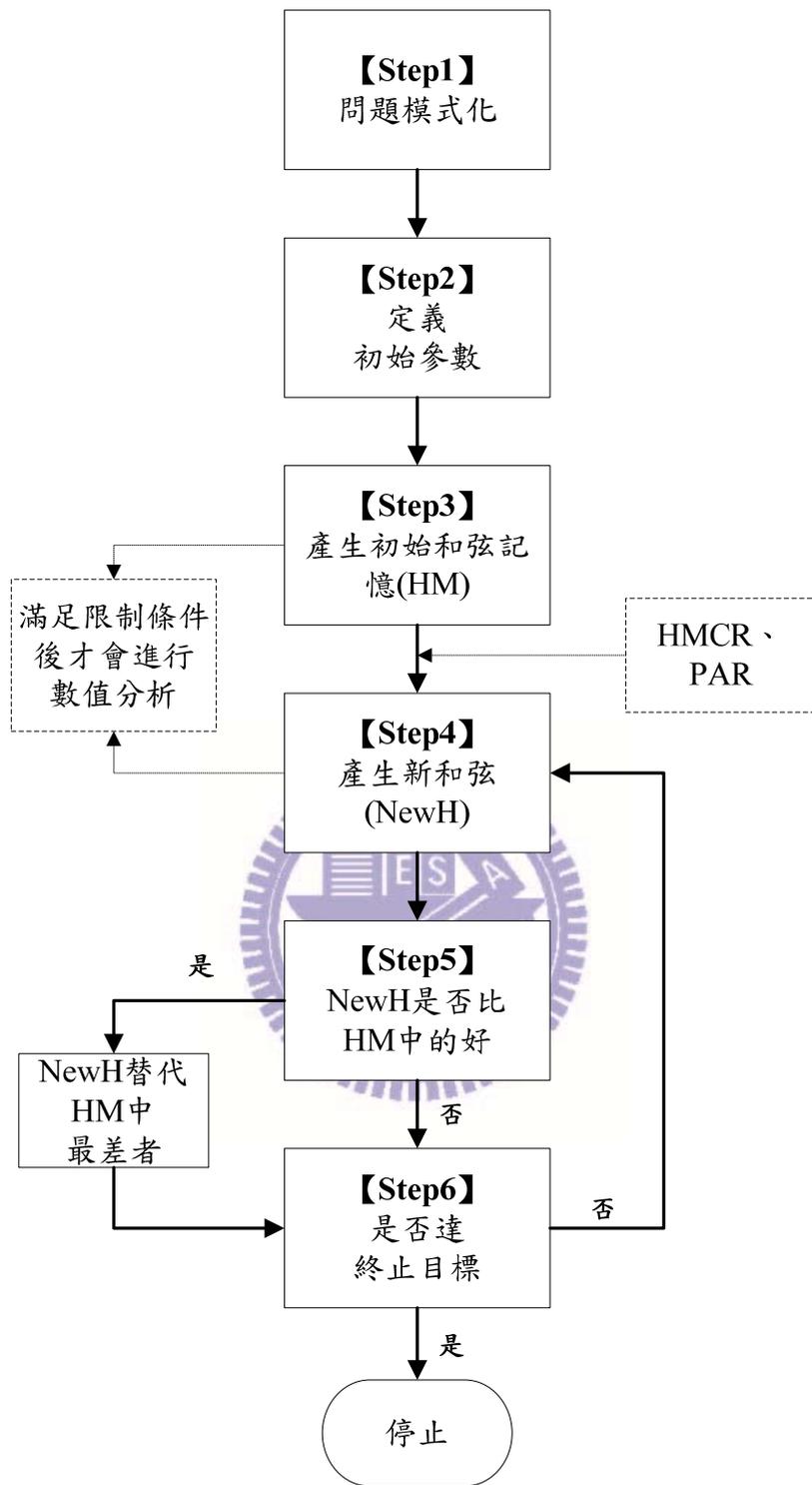


圖 3.17 和弦搜尋(HS)最佳化演算流程圖

步驟 1：

1. 變數

新山壩下游殼層存在高透水路徑示意圖表示如圖 3.18。

(1) 壩體各材料之滲透係數 k_i (k 或 k_h 或 k_v)，如圖 3.14 中之部分材料滲透係數視為設計變數。

(2) 壩體下游殼層存在高透水路徑表示為多項式

$$y = f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \quad (3-1)$$

其係數 a_0 、 a_1 、 \dots 、 a_n 或高透水路徑厚度 *thickness* ... 等視為變數。

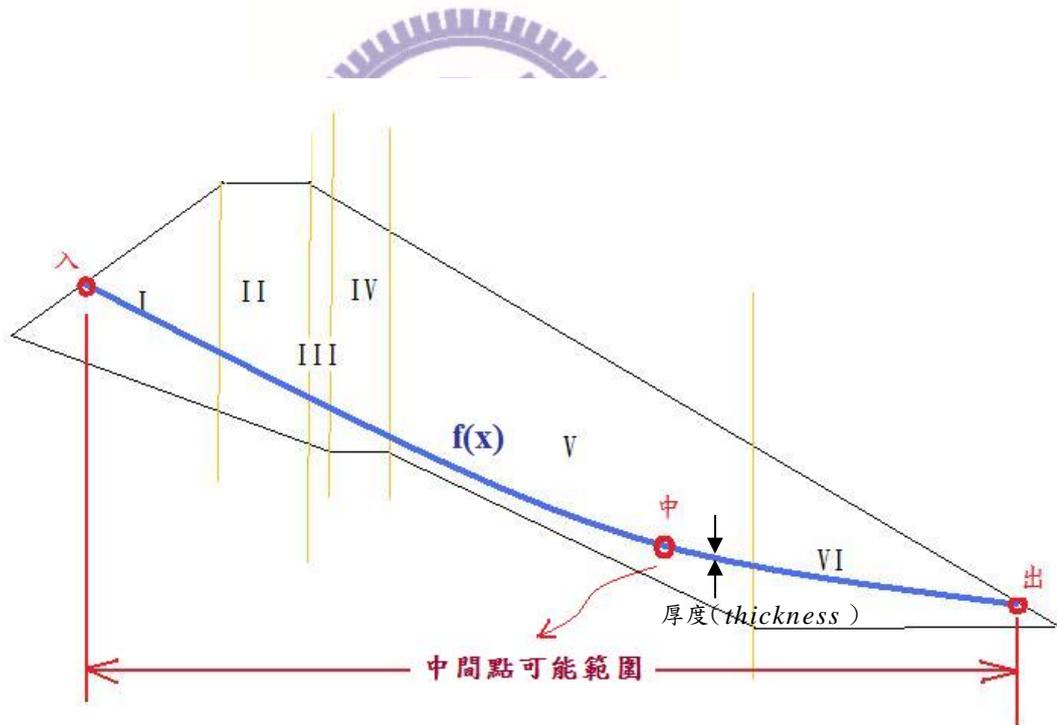


圖 3.18 新山壩下游殼層存在高透水路徑示意圖

2. 目標函數

滲流分析結果之計算值 \bar{q} 與觀測值 \bar{q}_i 比較，並配合不同數據(如：滲流量、觀測井水頭、圖 3.18 中紅色字的”出”為路徑與下游殼層壩面交點位置、高程)給定各別權重 α_i ，經正規化表示為

$$f_{obj} = \min \Phi^2 = \sum \alpha_i \left(\frac{\bar{q}_i - \bar{q}_i}{\bar{q}_i} \right)^2 \quad (3-2)$$

3. 限制條件

(1) 各材料滲透係數 k_i 範圍值限制

$$k_{i\min} \leq k_i \leq k_{i\max} \quad (3-3)$$

(2) 參考圖 3.18，路徑 $f(x)$ 整體必須在整個下游殼層範圍內。

(3) 參考圖 3.18，紅色字”入”到”出”之水平距離 $\geq d_{\min_headend}$ 。

(4) 高透水路徑厚度 $thickness$ ，需配合網格尺寸(2m×2m)

$$thickness = \{1, 2, \dots, thickness_n\} \quad (3-4)$$

4. 終止目標條件

(1) 最大迭代次數為 N_{\maxsearch}

(2) 滿足各目標因子容許範圍後，才判斷是否滿足

$$\varepsilon = |f_{obj_NewH} - \bar{f}_{obj_HM}| \leq 10^{-X} \quad (3-5)$$

式中 ε 為目標殘差值；

f_{obj_NewH} 為新和弦之目標值；

\bar{f}_{obj_HM} 為和弦記憶之平均目標值；

x 為正整數。

其中，各目標因子容許範圍表示為

$$d_{\min} \leq \bar{d}_{HM} \leq d_{\max} \text{ (距離因子)}$$

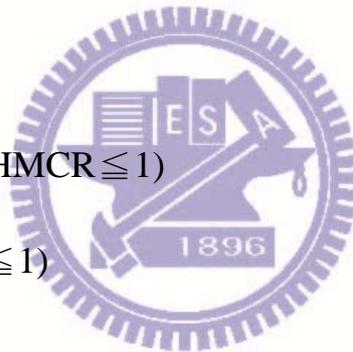
$$q_{\min} \leq \bar{q}_{HM} \leq q_{\max} \text{ (滲流量因子)}$$

$$th_{\min} \leq \bar{th}_{HM} \leq th_{\max} \text{ (總水頭因子)}$$

...等因子。

步驟 2：

1. 和弦記憶比率($0 \leq HMCR \leq 1$)
2. 調音比率($0 \leq PAR \leq 1$)
3. 調音大小(bw)
4. 和弦記憶大小(HMS)
5. 各目標因子權重值(α_i)，必要時可依各目標因子對目標函數影響之相對重要性與監測數據之相對可靠性指定各因子之權重值。
6. 其他(如：FLAC 滲流計算之參數設定...等)



步驟 3：

必須滿足限制條件後才進行 FLAC 滲流分析計算，並由計算結果得目標函數值，直到隨機產生一組大小為 HMS 之初始和弦記憶為止。

$$HM_0 = [H_1 \ H_2 \ \dots \ H_{HMS}]^T \quad (3-6)$$

步驟 4：

增加考慮 HMCR、PAR、bw 後，產生一個新和弦，並且必須滿足限制條件後才進行 FLAC 滲流分析計算

$$NewH = (y)' = f(x)' \quad (3-7)$$

其中，新和弦之各別設計變數產生方式分為三種，先隨機產生一變數 ran 判斷與 HMCR、PAR 之大小後，再決定變數產生方式。

1. 如同產生初始和弦之變數方式：

隨機產生，機率為(1-HMCR)。

2. 考慮和弦記憶中任一個設計變數值：

HM 選一值，機率為 HMCR×(1-PAR)。

3. 考慮和弦記憶中任一個設計變數值後，在 bw 範圍內做調整：

HM 選一值再做調整，機率為 HMCR×PAR。

步驟 5：

判斷 NewH 目標值是否比 HM 中，任何一個或數個的值小(好)，若是，則取代 HM 中值最大(差)者；否，則不更新 HM。然後迭代次數變為 $N=N+1$ 。

步驟 6：

1. 判斷新和弦是否滿足各目標因子容許範圍後，再判斷是否在目標殘差範圍內；

2. 判斷 N 是否大於 $N_{\max\text{search}}$

若滿足以上兩者其中一個，即可結束搜尋；否則繼續重覆步驟 4 與步驟 5，直到滿足終止目標條件為止。

以上可看出，本研究屬於限制性函數，又考慮數個目標因子之多目標函數，且變數可能有連續、不連續和離散之組合的混合式多變數函數，因此本研究屬於一種複合式的動態問題型態。

3.4 研究案例模擬之策略與規劃

本研究規劃分兩大部分進行。首先3.4.1節說明驗證方案之規劃，在第四章以這兩座材料分區明顯不同之土石壩，對本研究研擬之啟發式最佳化演算法進行驗證，其方式是假定壩體部分材料透水係數為設計變數，利用已知目標壩體總滲流量等數據來進行反算分析，以便驗證本研究研擬之啟發式最佳化演算法。3.4.2節為新山壩案例研究之規劃，將於第五章以新山土石壩案例進行本研究最佳化演算法之反算分析，主要擬定兩種情境之問題型態為：假設壩體下游殼層存在一高透水路徑，且此路徑以二次函數表示為變數形式，透過數值軟體進行滲流分析後，由計算結果與已知觀測或量測數據得到目標函數值。



3.4.1 驗證方案之規劃

鯉魚潭壩

圖 3.19 為鯉魚潭壩驗證方案之待定變數與已知之總壩體滲流量示意圖，說明如下：

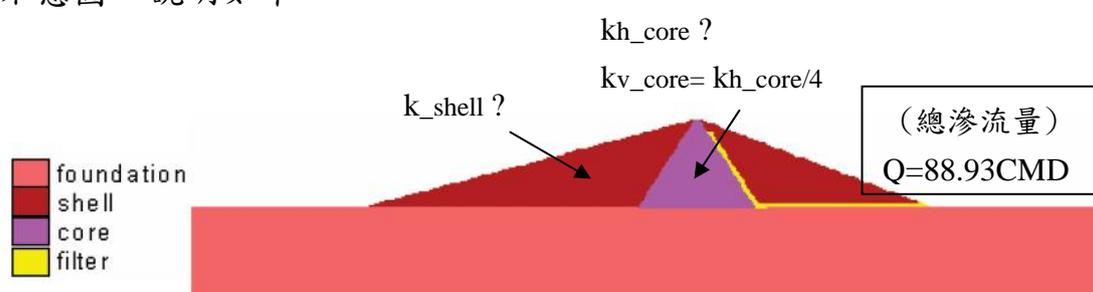


圖 3.19 鯉魚潭壩驗證方案擬定示意圖(改編自 陳冠亨，2006)

1. 待定變數(2個)

(1) 殼層之透水係數： k_{shell} 。

(2) 心層之水平透水係數： k_{h_core} 。

2. 限制條件

(1) 殼層透水係數(cm/sec)： $10^{-5} \leq k_{shell} \leq 9.99 \times 10^{-4}$ 。

(2) 心層透水係數(cm/sec)： $10^{-7} \leq k_{h_core} \leq 9.99 \times 10^{-6}$ 、

$$\frac{\text{水平透水係數}}{\text{垂直透水係數}} = \frac{k_{h_core}}{k_{v_core}} = 4。$$

(3) 其他(如:FLAC 滲流分析計算設定)。

其中，滲透係數以科學記號表示至小數點以下第二位。

3. 目標函數因子(1個)

單目標函數：

$$f_{obj} = \alpha_Q \left(\frac{\bar{Q}_{obs} - \bar{Q}_{HM}}{\bar{Q}_{obs}} \right)^2 \quad (3-8)$$

總壩體滲水量(CMD)： Q_{HM} ， $\bar{Q}_{obs} = 88.93$ 。

4. 參數設定

表 3.4 鯉魚潭壩驗證方案之參數設定

HMS	HMCR	PAR	bw	α_Q
10	0.5	0.7	2 單位	1

本研究設定隨機產生之滲透係數以科學記號表示至小數點以下第二位，因此，調整大小(bw)為 2 單位，指滲透係數調整大小為當前整數值加、減 2 之範圍內。如：當前值為 5.55×10^{-5} ，則隨機調整範圍為 3.55×10^{-5} 至 7.55×10^{-5} 之間。



5. 終止條件

- (1) 最大迭代次數 $N_{\text{maxsearch}} = 130$ 。
- (2) 先滿足 $87 \leq \bar{Q}_{HM} \leq 90$ 後，才判斷是否滿足

$$\varepsilon = \left| f_{\text{obj_NewH}} - \bar{f}_{\text{obj_HM}} \right| \leq 10^{-5}。$$

新山壩

圖 3.20 為新山壩驗證方案之待定變數與已知之總壩體滲流量，
 圖 3.21 為假定兩個觀測井水位計埋設點所對應之網格位置，表 3.5 為
 新山壩驗證方案各材料之透水係數設計值，說明如下：

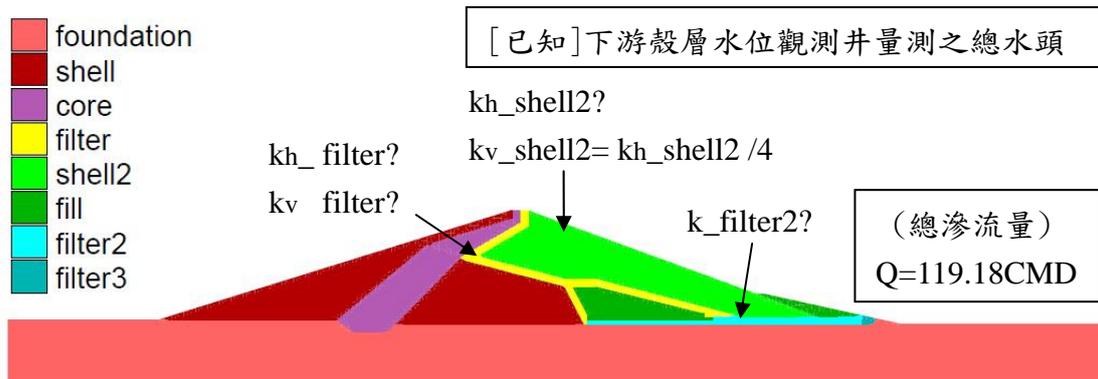


圖 3.20 新山壩驗證方案擬定示意圖

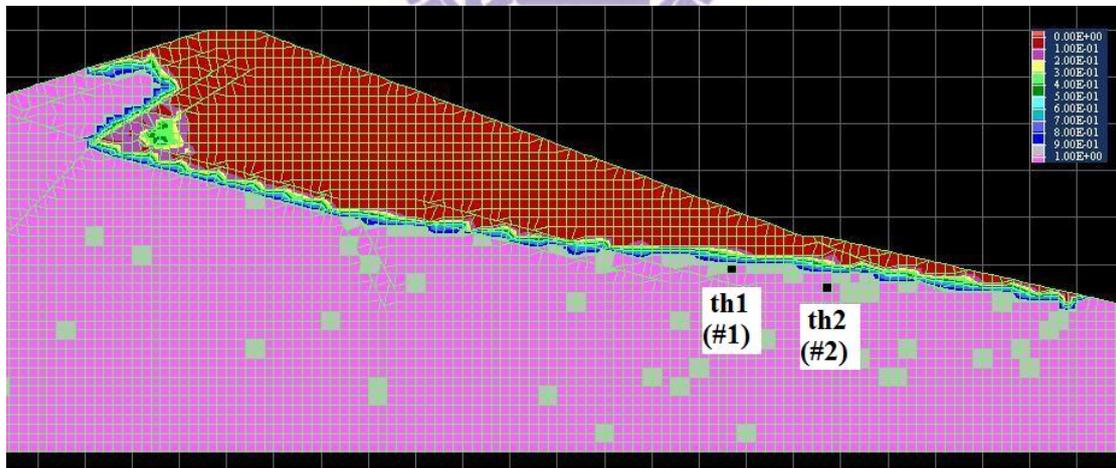


圖 3.21 新山壩驗證方案之浸潤面與水位井位置

表 3.5 新山壩驗證方案各材料之透水係數(單位：cm/sec)

材料	基礎 (foundation)	心層 (core)	上游 殼層 (shell)	雜項 填方 (fill)	下游 殼層 (shell2)	〈型 濾層 (filter)	水平 濾層 (filter2)	水平濾層 出口 (filter3)
k_h	1×10^{-6}	4.16×10^{-6}	7.6×10^{-5}	6×10^{-5}	4×10^{-5}	3.6×10^{-4}	3.6×10^{-4}	2.88×10^{-2}
k_v		1.04×10^{-6}	1.9×10^{-6}	1.5×10^{-5}	1×10^{-5}	3.6×10^{-4}	3.6×10^{-4}	7.2×10^{-3}

1. 待定變數(4 個)

- (1) 下游殼層之透水係數： k_h_shell2 。
- (2) 〈型濾層之透水係數： k_h_filter 、 k_v_filter 。
- (3) 水平濾層之透水係數： $k_filter2$ 。



2. 限制條件

- (1) 下游殼層透水係數(cm/sec)： $10^{-5} \leq k_h_shell2 \leq 9.99 \times 10^{-4}$ 、
 $\frac{k_h_shell2}{k_v_shell2} = 4$ 。
- (2) 〈型濾層透水係數(cm/sec)： $10^{-4} \leq k_h_filter \leq 9.99 \times 10^{-3}$ 、
 $10^{-4} \leq k_v_filter \leq 9.99 \times 10^{-3}$ 。
- (3) 水平濾層透水係數(cm/sec)： $10^{-4} \leq k_filter2 \leq 9.99 \times 10^{-3}$ 。
- (4) 其他(如:FLAC 滲流分析計算設定)。

其中，滲透係數以科學記號表示至小數點以下第二位，且各材料

$$k_h \geq k_v。$$

3. 目標函數因子(3 個)

目標函數：

$$f_{obj} = \alpha_Q \left(\frac{\bar{Q}_{obs} - \bar{Q}_{HM}}{\bar{Q}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th1} \left(\frac{\bar{th1}_{obs} - \bar{th1}_{HM}}{\bar{th1}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th2} \left(\frac{\bar{th2}_{obs} - \bar{th2}_{HM}}{\bar{th2}_{obs}} \right)^2 \quad (3-9)$$

(1) 總壩體滲水量(CMD)： Q_{HM} ， $\bar{Q}_{obs} = 119.18$ 。

(2) 兩個水位觀測井之總水頭(m)： $th1_{HM}$ 、 $th2_{HM}$ ，

$\bar{th1}_{obs} = 41.22$ 、 $\bar{th2}_{obs} = 38.95$ 。



4. 參數設定

表 3.6 新山壩驗證方案之參數設定

HMS	HMCR	PAR	bw	α_Q	α_{th1}	α_{th2}
10	0.5	0.7	2 單位	1	1	1

本研究設定隨機產生之滲透係數以科學記號表示至小數點以下第二位，因此，調整大小(bw)為 2 單位，指當前滲透係數之整數值加、減 2 之範圍內。如：當前值為 5.55×10^{-5} ，則隨機調整範圍為 3.55×10^{-5} 至 7.55×10^{-5} 之間。

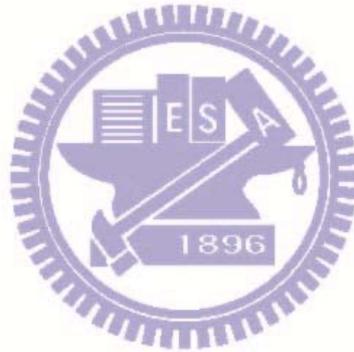
5. 終止條件

(1) 最大迭代次數 $N_{\text{maxsearch}} = 350$ 。

(2) 先滿足 $118 \leq \bar{Q}_{HM} \leq 120$ 、 $40.7 \leq \bar{th1}_{HM} \leq 41.7$ 與

$38.5 \leq \bar{th2}_{HM} \leq 39.5$ 後，才判斷是否滿足

$$\varepsilon = \left| f_{\text{obj_NewH}} - \bar{f}_{\text{obj_HM}} \right| \leq 10^{-5}。$$



3.4.2 新山壩案例研究之規劃

研究情境 1

圖 3.22 為研究情境 1 之壩體下游殼層高透水路徑擬定示意圖，說明如下：

1. 待定變數(3 個)

下游殼層存在一高透水路徑，並表示為 x 的二次函數

$y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$ ，並由三個座標點在邊界範圍內隨機產生，

產生順序分別為入 $(x_head, y_head) \rightarrow$ 出 $(x_end, y_end) \rightarrow$ 中

(x_mid, y_mid) ，待定變數為： a_0 、 a_1 、 a_2 。

2. 限制條件

- (1) 入 (x_head, y_head) 落在下游殼層之上游邊界 EL.82m 以下。
- (2) 出 (x_end, y_end) 落在下游殼層之下游邊界 EL.82m 以下。
- (3) x_head 必須在 x_end 上游側距離至少 $dmin_headend=10m$ 。
- (4) $x_head < x_mid < x_end$ 。
- (5) 高透水路徑必須在下游殼層內部。將下游殼層區分為六區(I、II、III、IV、V、VI)，因此，當路徑通過某區時，必須在此區域之頂部與底部邊界內。
- (6) 其他(如:FLAC 滲流分析計算設定)。

3. 目標函數因子(2個)

目標函數：

$$f_{obj} = \alpha_d \left(\frac{\bar{d}_{obs} - \bar{d}_{HM}}{\bar{d}_{obs}} \right)^2 + \alpha_q \left(\frac{\bar{q}_{obs} - \bar{q}_{HM}}{\bar{q}_{obs}} \right)^2 \quad (3-10)$$

(1) 平台出水點(EL.46m)至一固定參考點之距離(m)： d_{HM} ，

$$\bar{d}_{obs} = 77.91 \text{。}$$

(2) 平台滲水量(CMD)： q_{HM} ， $\bar{q}_{obs} = 0.5$ 。

※單位壩長滲流量(m³/day/m)=單位長度滲流量(m³/sec/m)×86400

4. 參數設定

表 3.7 新山壩案例研究情境 1 之參數設定

HMS	HMCR	PAR	bw	α_d	α_q
10	0.5	0.5	4m	2	0.5

5. 終止條件

(1) 最大迭代次數 $N_{maxsearch} = 200$ 。

(2) 先滿足 $80.666 \leq \bar{d}_{HM} \leq 75.158$ 與 $0.2 \leq \bar{q}_{HM} \leq 0.6$ 後，才判斷是

$$\text{否滿足 } \varepsilon = \left| f_{obj_NewH} - \bar{f}_{obj_HM} \right| \leq 10^{-5} \text{。}$$

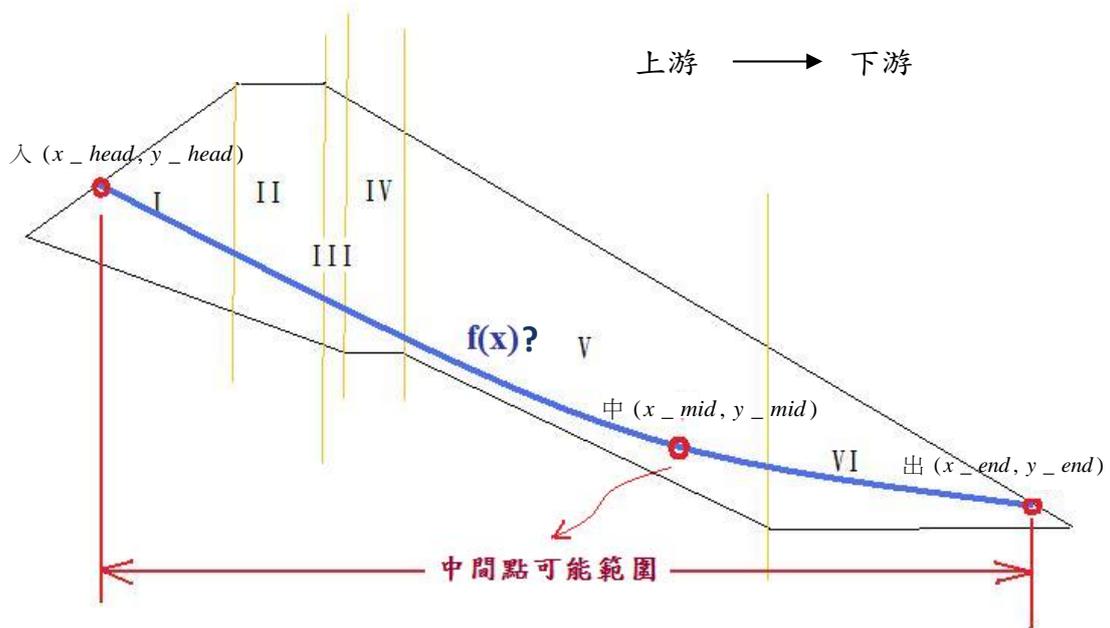


圖 3.22 研究情境 1_壩體下游殼層高透水路徑擬定示意圖



研究情境 2

圖 3.23 為研究情境 2 之壩體下游殼層高透水路徑擬定示意圖，說明如下：

1. 待定變數(4 個)

(1) 下游殼層存在一高透水路徑，並表示為 x 的二次函數

$y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$ ，並由三個座標點在邊界範圍內隨機產生，產生順序分別為入 $(x_head, y_head) \rightarrow$ 出 (x_end, y_end)

\rightarrow 中 (x_mid, y_mid) ，待定變數為： a_0 、 a_1 、 a_2 。

(2) 路徑厚度也視為 1 變數： $thickness$ 。



2. 限制條件

(1) 入 (x_head, y_head) 落在下游殼層之上游邊界 EL.82m 以下。

(2) 出 (x_end, y_end) 落在下游殼層之下游邊界 EL.82m 以下。

(3) x_head 必須在 x_end 上游側距離至少 $dmin_headend=10m$ 。

(4) $x_head < x_mid < x_end$ 。

(5) 高透水路徑必須在下游殼層內部。將下游殼層區分為六區(I、II、III、IV、V、VI)，因此，當路徑通過某區時，必須在此區域之頂部與底部邊界內。

(6) 假設高透水路徑位於浸潤面之上，因此 $f(x)$ 不通過三個水位

觀測井之間的水位以下。

(7) $thickness = \{1, 2, \dots, 5\}$ 網格(1 網格尺寸為 2m×2m)。

(8) 其他(如:FLAC 滲流分析計算設定)。

3. 目標函數因子(5 個)

目標函數：

$$\begin{aligned}
 f_{obj} = & \alpha_d \left(\frac{\bar{d}_{obs} - \bar{d}_{HM}}{\bar{d}_{obs}} \right)^2 + \alpha_q \left(\frac{\bar{q}_{obs} - \bar{q}_{HM}}{\bar{q}_{obs}} \right)^2 \\
 & + \alpha_{th1} \left(\frac{\bar{th1}_{obs} - \bar{th1}_{HM}}{\bar{th1}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th2} \left(\frac{\bar{th2}_{obs} - \bar{th2}_{HM}}{\bar{th2}_{obs}} \right)^2 \\
 & + \alpha_{th3} \left(\frac{\bar{th3}_{obs} - \bar{th3}_{HM}}{\bar{th3}_{obs}} \right)^2
 \end{aligned} \quad (3-11)$$

(1) 平台出水點(EL.46m)至一固定參考點之距離(m)： d_{HM} ，

$$\bar{d}_{obs} = 77.91。$$

(2) 平台滲水量(CMD)： q_{HM} ， $\bar{q}_{obs} = 0.5$ 。

(3) 三個水位觀測井之總水頭(m)： $th1_{HM}$ 、 $th2_{HM}$ 、 $th3_{HM}$ ，

$$\bar{th1}_{obs} = 53、\bar{th2}_{obs} = 48.5、\bar{th3}_{obs} = 43。$$

4. 參數設定

表 3.8 新山壩案例研究情境 2 之參數設定

HMS	HMCR	PAR	bw	α_d	α_q	α_{th1}	α_{th2}	α_{th3}
10	0.5	0.5	4m	2	0.5	1	1	1

5. 終止條件

(1) 最大迭代次數 $N_{\text{maxsearch}} = 115$ 。

(2) 先滿足 $80.666 \leq \bar{d}_{HM} \leq 75.158$ 、 $0.2 \leq \bar{q}_{HM} \leq 0.6$ 、

$52.5 \leq \bar{th}_1_{HM} \leq 53.5$ 、 $48.0 \leq \bar{th}_2_{HM} \leq 49.0$ 與 $42.5 \leq \bar{th}_3_{HM} \leq 43.5$

後，才判斷是否滿足 $\varepsilon = |f_{\text{obj}_{\text{NewH}}} - \bar{f}_{\text{obj}_{\text{HM}}}| \leq 10^{-5}$ 。

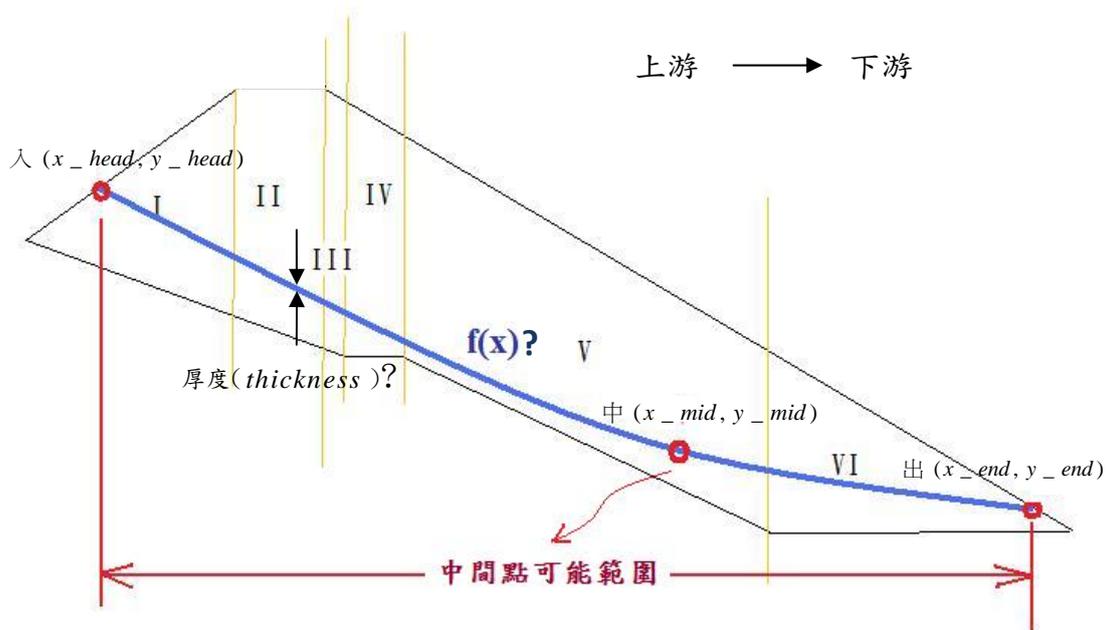


圖 3.23 研究情境 2_壩體下游殼層高透水路徑擬定示意圖

第四章 最佳化搜尋模式之驗證

本章分別以壩體分區較為對稱之鯉魚潭壩，與壩體分區較不對稱的新山壩進行和弦搜尋法最佳化模式之驗證。驗證方式乃先藉一組預設壩材之透水係數先計算得滲漏量與水頭分布，將此滲漏量或/與水頭分布當作被擬合之對象（即視為虛擬之觀測值）。繼而假設部分壩材透水係數為待定變數，由（FLAC）數值分析結果與已知觀測值間之正規化差值總和以定義目標函數值，進而以和弦搜尋法最佳化模式搜尋以得到待定之部分壩材透水係數組合，再與原透水係數（視為真實值）相較，以驗證和弦搜尋法最佳化模式。

4.1 節說明藉鯉魚潭壩進行最佳化模式驗證之結果，其驗證方式如下：

1. 先以第三章 表 3.1 鯉魚潭壩體材料之透水係數為一組已知參數（視為真實值），進行滲流分析得到總壩體滲流量($Q=88.93\text{CMD}$)，作為最佳化演算驗證之單一目標函數因子。
2. 假設兩個壩材透水係數(心層水平透水係數與殼層透水係數)為未知數（待定變數），且心層之水平透水係數為心層垂直透水係數之 4 倍，最後將 HS 最佳化反算結果之最佳和弦之待定變數值與真實值做比較。

4.2 節則說明藉新山壩進行最佳化模式驗證之結果，其驗證方式：

1. 先以第三章 表 3.5 新山壩體材料之透水係數為一組真實值，進行滲流分析得到總壩體滲流量($Q=119.18\text{CMD}$)與第三章中圖 3.21 兩處虛擬水位觀測井之總水頭($th1=41.22\text{m}$ 與 $th2=38.95\text{m}$)，作為新山壩案例最佳化驗證之多目標函數因子。

2. 假設下游殼層水平透水係數(k_{h_shell2} ， $\frac{k_{h_shell2}}{k_{v_shell2}}=4$)、<型濾層水平與垂直透水係數(k_{h_filter} 、 k_{v_filter})、水平濾層透水係數($k_{filter2}$)三個壩材為待定變數，因此共 4 個待定變數，最後同樣地將 HS 最佳化反算結果之最佳和弦之待定變數值與真實值做比較。

4.3 節為小結，以討論本研究研擬之和弦搜尋(HS)最佳化演算法之驗證結果與其適用性。



4.1 鯉魚潭壩案例驗證之結果

表 4.1 為鯉魚潭壩體材料滲透係數設定值，其中心層水平透水係數與殼層透水係數，均設定為待定變數，並且 $\frac{\text{心層之水平透水係數}}{\text{心層之垂直透水係數}} = 4$ 。考慮之目標因子為總壩體滲流量(Q)，其目標設計值為 88.93 CMD。

表 4.1 鯉魚潭壩案例之壩體材料滲透係數(單位:cm/sec)

材料分區		心層 (core)	殼層 (shell)	濾層 (filter)	基礎 (foundation)
透水係數	kh	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	2.5×10^{-3}	1×10^{-5}
	kv	$(k_{h_core})/4$			

圖 4.1 為迭代次數與和弦記憶(HM)之平均目標函數值之關係圖，共搜尋了 130 次，最後 HM 函數平均值約收斂至 0.0000479。圖 4.2 為迭代次數(N)與 HM 中滲流量之目標因子平均值之關係圖，並於搜尋第 60 次之後的 HM 平均值，均在目標值 88.93 CMD 上下。

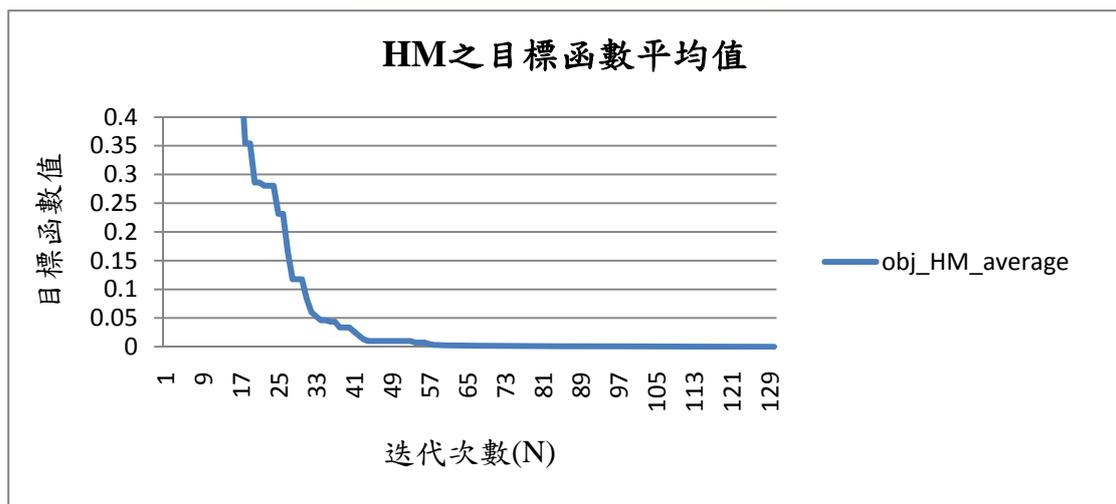


圖 4.1 鯉魚潭壩案例之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖

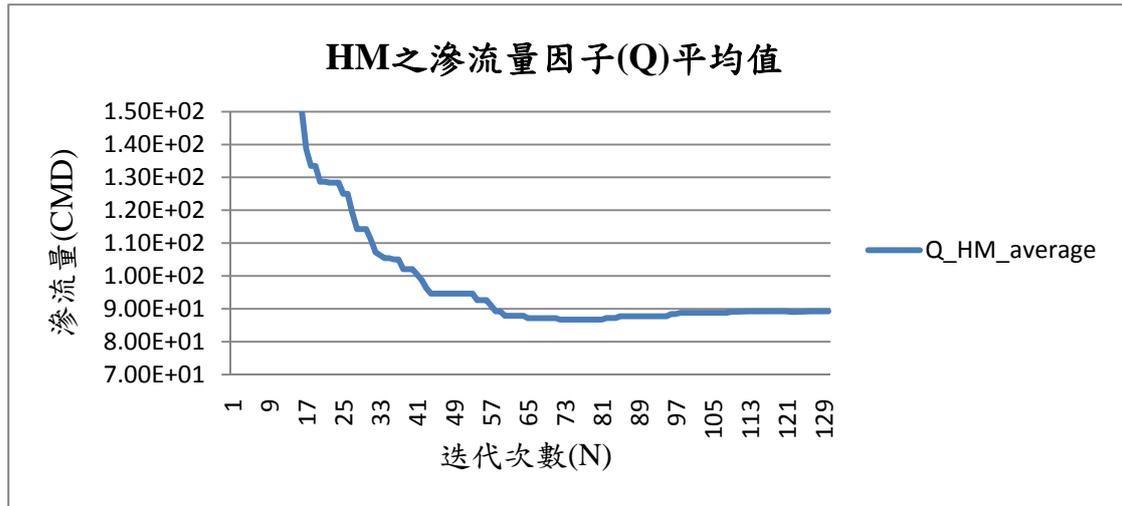


圖 4.2 鯉魚潭壩案例之迭代次數與 HM 滲流量之關係圖

此外，各別將 2 個待定變數之 HM 平均值與迭代之搜尋次數之關係圖，分別表示為圖 4.3 至圖 4.4。由結果可看出，心層水平透水係數經最佳化搜尋過程漸漸趨近真實值 4×10^{-7} cm/sec；殼層透水係數同樣地往真實值 5×10^{-5} cm/sec 收斂。

圖 4.5 為最佳化搜尋中最佳目標值和弦之飽和度圖，迭代次數 (N)=109；目標函數值=0.0000055；壩體總滲流量=88.72 CMD；心層之 $k_h=2.53 \times 10^{-7}$ cm/sec；殼層之 $k=5.89 \times 10^{-5}$ cm/sec。表 4.2 為鯉魚潭壩案例之真實值與最佳 HM₁₃₀(依目標函數值小至大排序)之目標函數值(f_obj)、總滲流量(Q)與心層水平透水係數(k_{h_core})和殼層透水係數(k_{shell})兩待定變數值之比較，表中 1_{N=109}_HM₁₃₀ 符號說明：HM₁₃₀ 表示最後一次迭代為 130 次之和弦記憶，且和弦記憶大小(HMS)為 10；1_{N=109} 表示為 HM 中目標函數值為第 1 小且此次和弦(H)為迭代第 109 次時所產生的。另由最佳 10 個和弦之平均值各項結果顯示，均與真實值相近，因此可看出待定變數值最佳解並未發生陷入局部解情形。

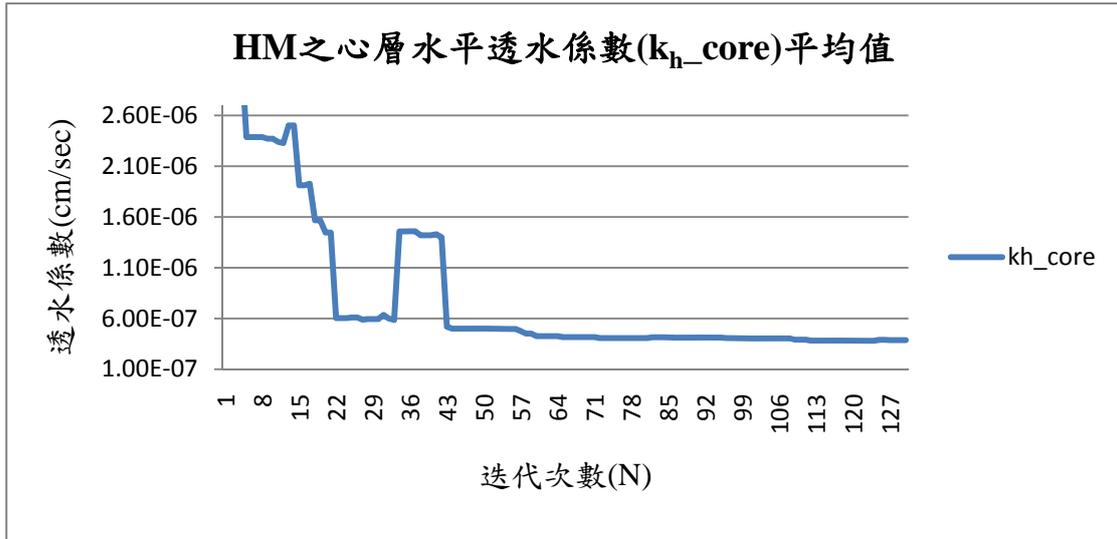


圖 4.3 鯉魚潭壩案例之迭代次數與 HM 心層(k_h)變數之關係圖

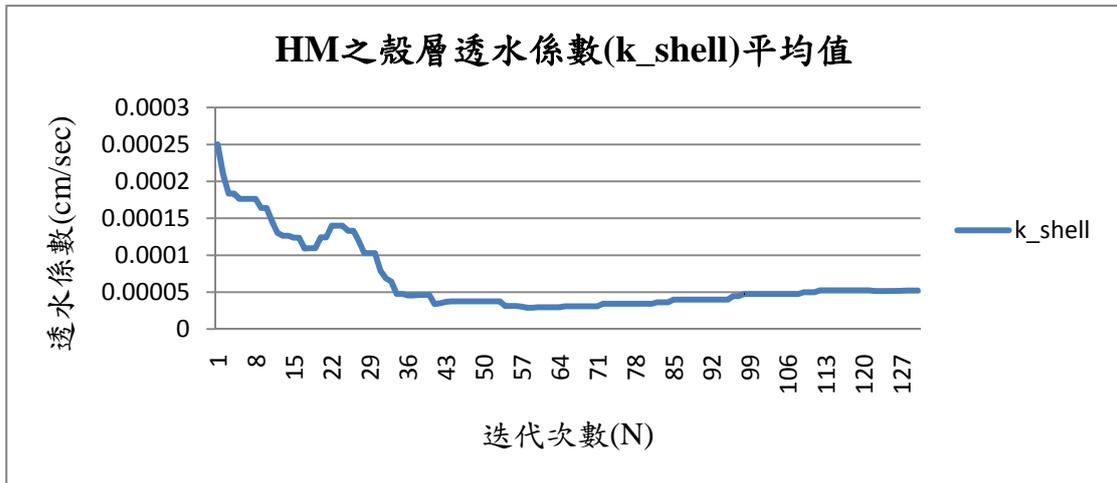


圖 4.4 鯉魚潭壩案例之迭代次數與 HM 殼層(k)變數之關係圖

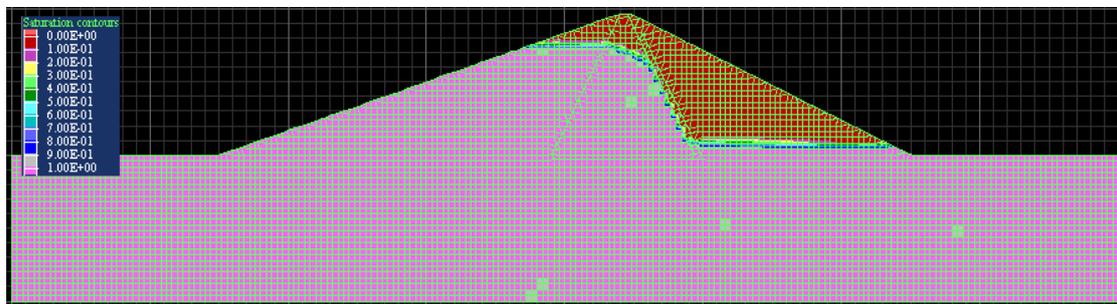


圖 4.5 鯉魚潭壩案例之最佳和弦(H)飽和度圖(N=109)

表 4.2 鯉魚潭壩案例之真實值與最佳 HM₁₃₀ 之比較

	f_obj	Q(CMD)	k _{h_core} (cm/sec)	k _{shell} (cm/sec)
原設計值	0	88.93	4.00×10 ⁻⁷	5.00×10 ⁻⁵
1 _{N=109} _HM ₁₃₀	5.52×10 ⁻⁶	88.72	2.53×10 ⁻⁷	5.89×10 ⁻⁵
2 _{N=82} _HM ₁₃₀	7.99×10 ⁻⁶	89.18	4.11×10 ⁻⁷	4.86×10 ⁻⁵
3 _{N=125} _HM ₁₃₀	9.30×10 ⁻⁶	88.66	4.12×10 ⁻⁷	4.51×10 ⁻⁵
4 _{N=122} _HM ₁₃₀	2.03×10 ⁻⁵	89.33	3.67×10 ⁻⁷	5.88×10 ⁻⁵
5 _{N=44} _HM ₁₃₀	2.57×10 ⁻⁵	89.38	4.31×10 ⁻⁷	4.80×10 ⁻⁵
6 _{N=127} _HM ₁₃₀	5.25×10 ⁻⁵	88.29	3.51×10 ⁻⁷	5.34×10 ⁻⁵
7 _{N=72} _HM ₁₃₀	8.07×10 ⁻⁵	89.73	4.04×10 ⁻⁷	5.33×10 ⁻⁵
8 _{N=98} _HM ₁₃₀	8.07×10 ⁻⁵	89.73	4.04×10 ⁻⁷	5.33×10 ⁻⁵
9 _{N=65} _HM ₁₃₀	8.58×10 ⁻⁵	89.75	4.04×10 ⁻⁷	5.34×10 ⁻⁵
10 _{N=85} _HM ₁₃₀	1.11×10 ⁻⁴	89.87	4.32×10 ⁻⁷	5.01×10 ⁻⁵
HM ₁₃₀ 平均值	4.79×10 ⁻⁵	89.26	3.87×10 ⁻⁷	5.23×10 ⁻⁵

4.2 新山壩案例驗證之結果

表 4.3 為新山壩體材料滲透係數，其中 k_{h_shell2} 、 k_{v_shell2} 、 k_{h_filter} 、 k_{v_filter} 、 $k_{filter2}$ 均設定為變數，並且須滿足 $k_h \geq k_v$ 與 $\frac{k_{h_shell2}}{k_{v_shell2}} = 4$ 。目標因子：總壩體滲流量與兩個水位觀測井總水頭，

其目標值與位置高程如表 4.4。

表 4.3 新山壩案例之壩體材料滲透係數(單位: cm/sec)

材料	基礎 (foundation)	心層 (core)	上游 殼層 (shell)	雜項 填方 (fill)	下游 殼層 (shell2)	< 型 濾層 (filter)	水平 濾層 (filter2)	水平濾層 出口 (filter3)
k_h	1×10^{-6}	4.16×10^{-6}	7.6×10^{-5}	6×10^{-5}	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	2.88×10^{-2}
k_v		1.04×10^{-6}	1.9×10^{-6}	1.5×10^{-5}	$(k_{h_shell2}) / 4$	$10^{-3} \sim 10^{-4}$		7.2×10^{-3}

表 4.4 新山案例之各目標因子設計值

目標因子	目標值	位置高程(m)
總滲流量, CMD	119.18	—
水位觀測井總水頭(#1), m	41.22	EL.39
水位觀測井總水頭(#2), m	38.95	EL.35

圖 4.6 為迭代次數(N)與和弦記憶(HM)之平均目標函數值之關係圖，共搜尋了 350 次，最後 HM 函數平均值約收斂至 0.000103。圖 4.7 為迭代次數與 HM 中的滲流量因子平均值之關係圖，並於搜尋第 180 次之後的 HM 平均值，均在目標值 119.18CMD 上下；另外兩個 HM 中的總水頭因子(th1、th2)與迭代次數之關係圖，如圖 4.8 與圖 4.9，其中 th1 搜尋第 207 次之後的 HM 平均值，均在目標值 41.22 m 上下，而 th2 搜尋第 141 次之後的 HM 平均值，均在目標值 38.95 m 上下。由以上可看出，以 th1 收斂速度最慢，因此目標函數於搜尋第 207 次之函數平均值為 0.000152 與最終收斂平均值相近。

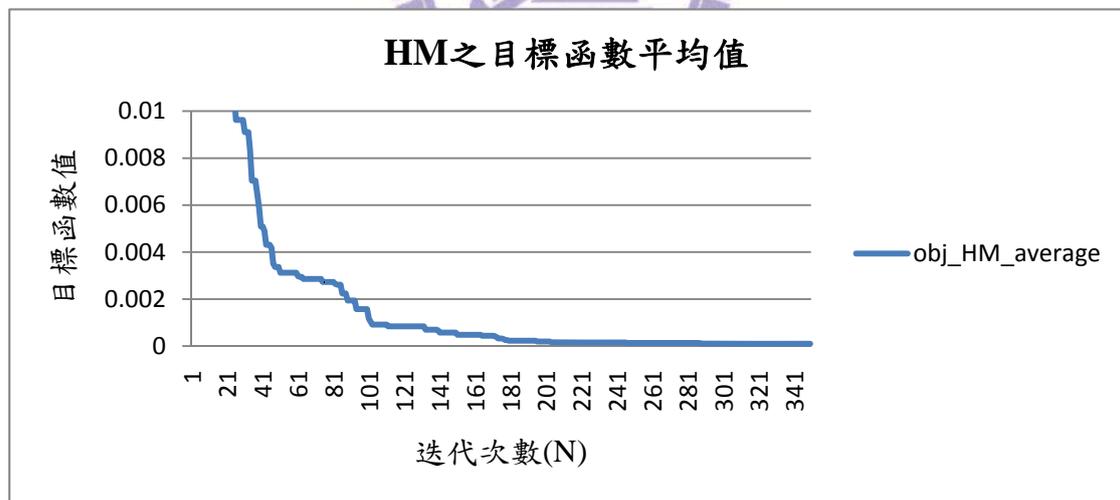


圖 4.6 新山壩案例之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖

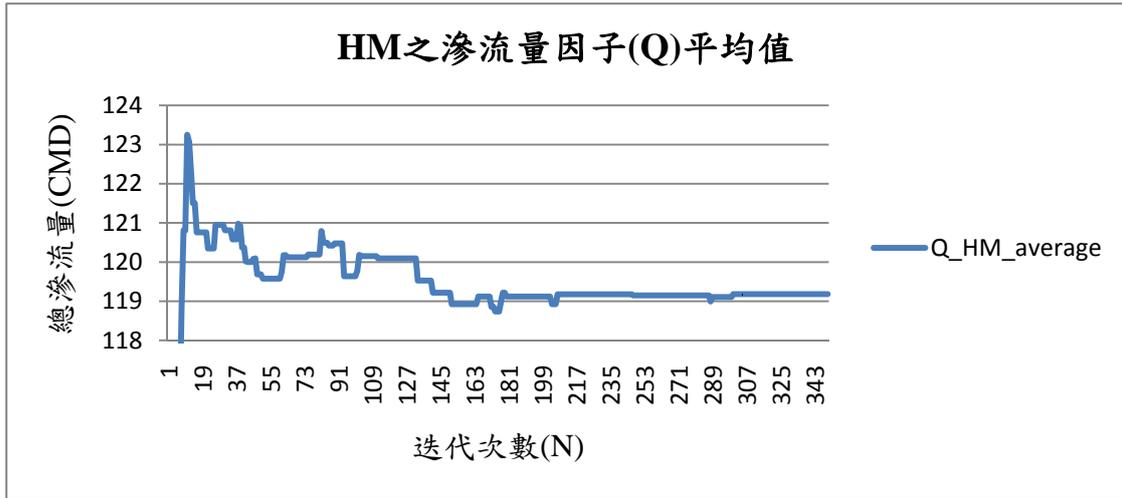


圖 4.7 新山壩案例之迭代次數與 HM 滲流量因子之關係圖

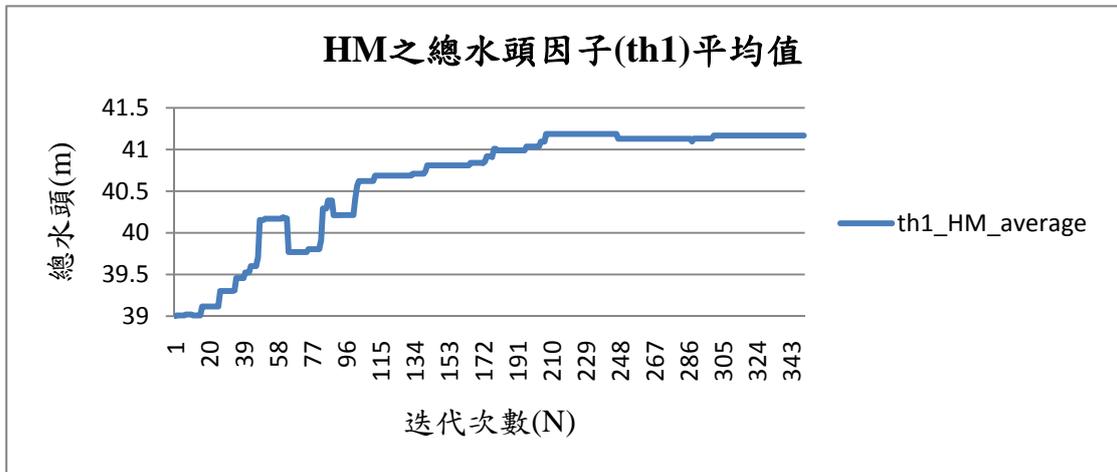


圖 4.8 新山壩案例之迭代次數與 HM 總水頭因子(th1)之關係圖

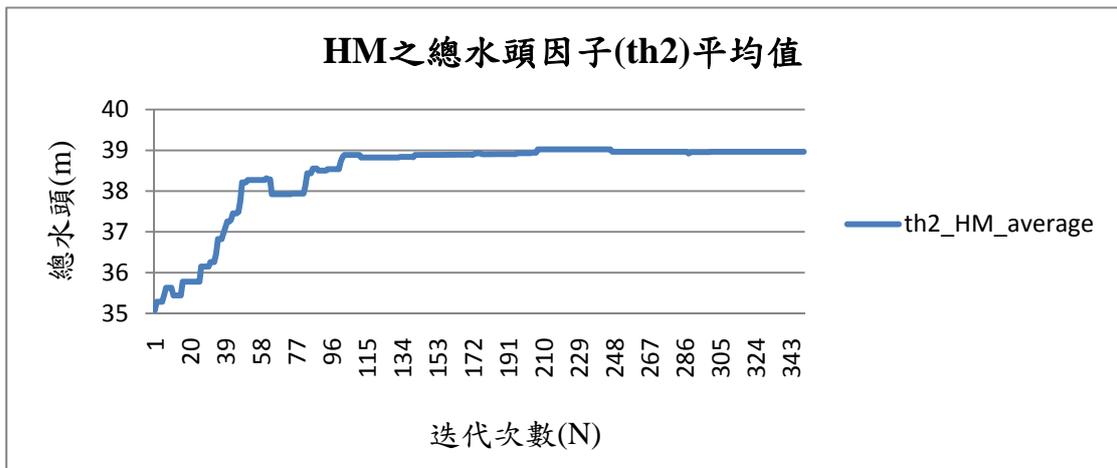


圖 4.9 新山壩案例之迭代次數與 HM 總水頭因子(th2)之關係圖

此外，將4個待定變數之HM平均值與迭代之搜尋次數之關係圖，分別表示為圖 4.10 至圖 4.13。

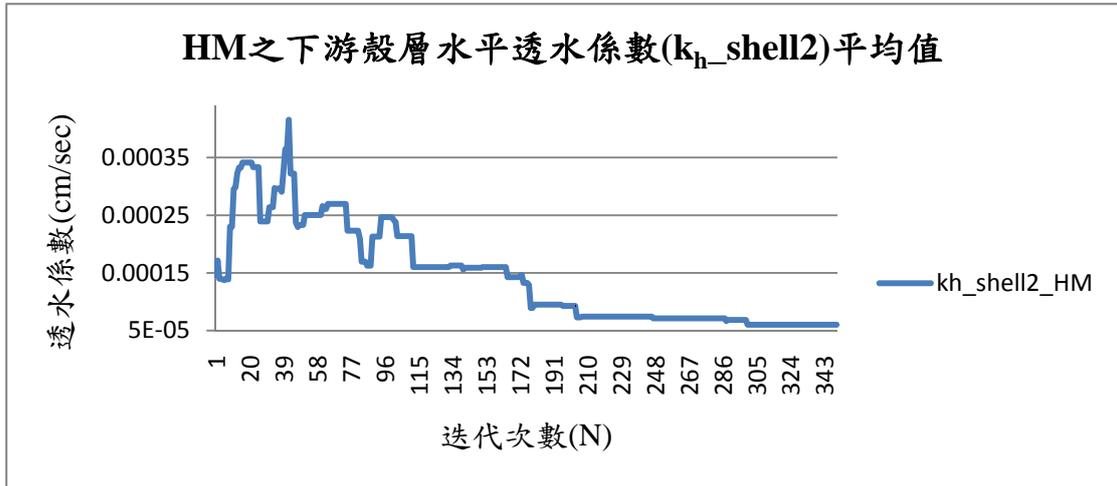


圖 4.10 新山壩案例之迭代次數與 HM 下游殼層(k_h)變數之關係圖

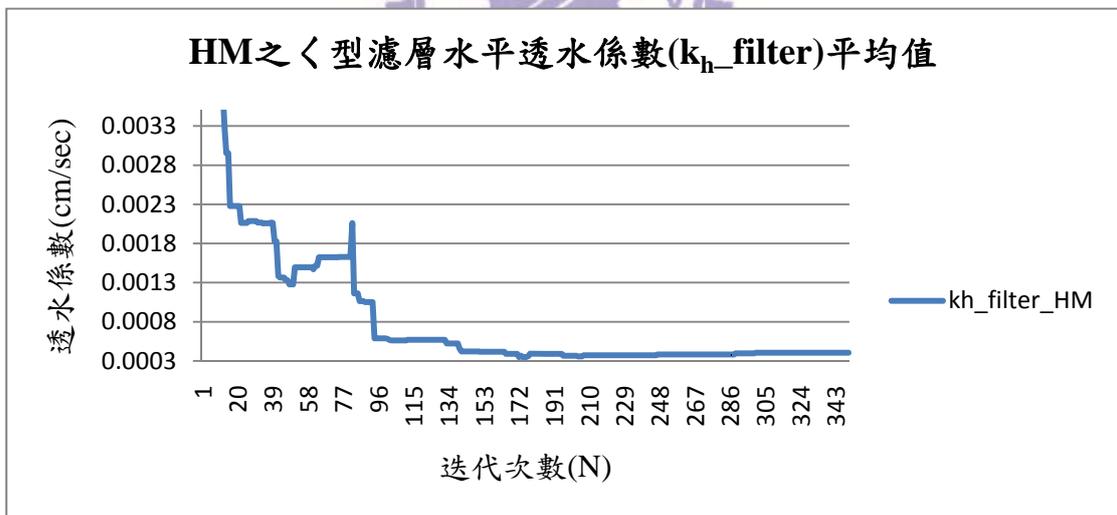


圖 4.11 新山壩案例之迭代次數與 HM 〈型濾層(k_h)變數之關係圖

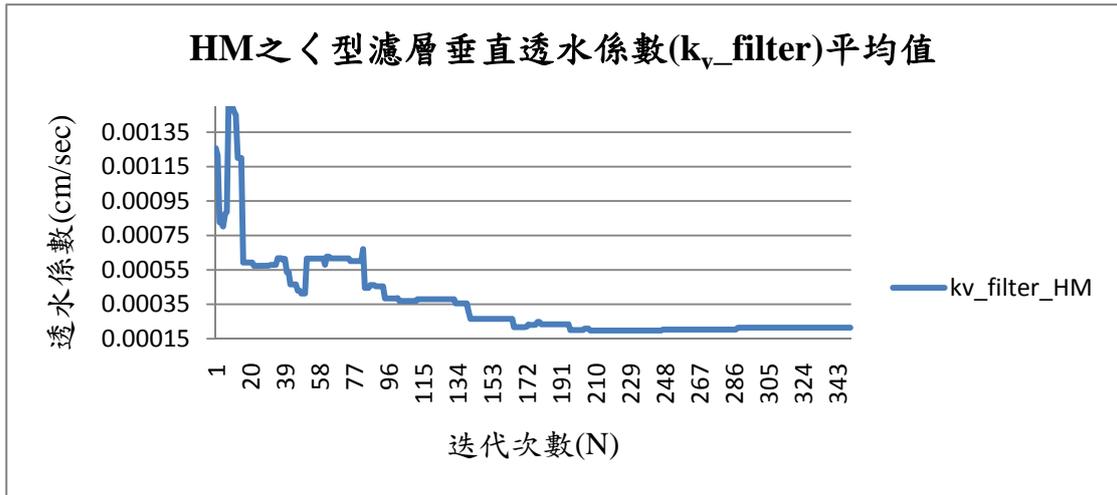


圖 4.12 新山壩案例之迭代次數與 HM 〈型濾層(k_v)變數之關係圖

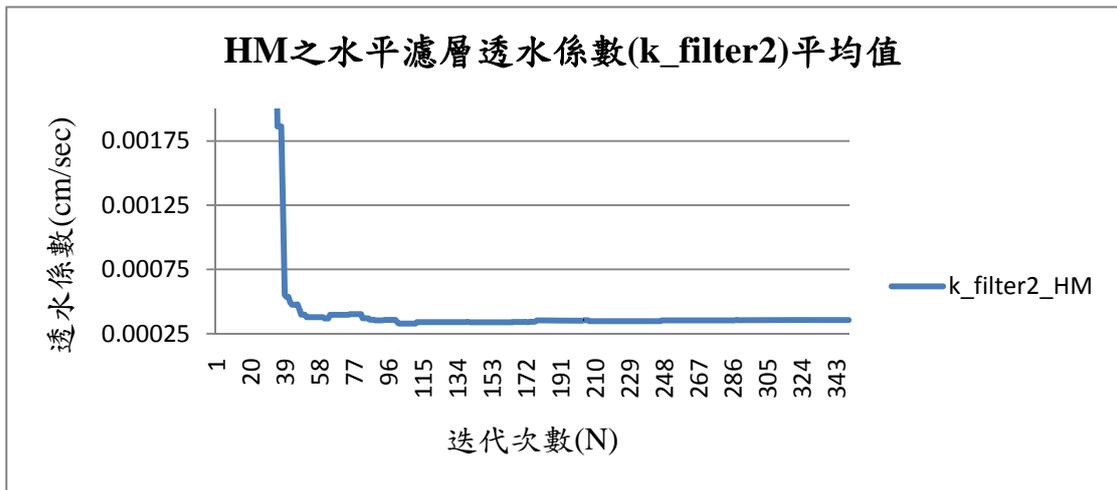


圖 4.13 新山壩案例之迭代次數與 HM 水平濾層(k)變數之關係圖

由以上 4 個變數搜尋結果顯示：

1. 下游殼層水平透水係數平均值漸漸趨近 $6 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$
(真實值= $4 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$)；
2. 〈型濾層水平透水係數平均值漸漸趨近 $4 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$
(真實值= $3.6 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$)

3. <型濾層垂直透水係數平均值漸漸趨近 $2.2 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$

(真實值= $3.6 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$)

4. 水平濾層透水係數平均值漸漸趨近 $3.6 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$

(真實值= $3.6 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$)

迭代 350 次中最佳目標函數值計算之結果，即第 101 次 (N_saerch=101)，其目標函數值(f_{\min_obj})為 0.0000597。目標因子之一的總壩體滲流量(HM_Q)為 120.04CMD，與目標值 119.18CMD 相近；而總水頭之目標因子 th1 值為 41.33m，與目標值 41.22m 相當接近；水頭之目標因子 th2 值為 38.95m，與目標值 38.95m 相等，並結果標示於圖 4.14 之飽和度圖上。此外，將搜尋之最佳待定變數值標示於圖 4.15 壩材分布圖中，其中，壩材之四個待定變數中，以水平濾層透水係數與真實值(圖 4.15 以黃色外框表示真實值)最為接近。

表 4.5 為新山壩案例之待定變數值與最佳 HM_{350} (依目標函數值小至大排序)之目標函數值(f_{obj})、總滲流量(Q)、總水頭(th1、th2)與下游殼層之水平透水係數(k_{h_shell2})、<型濾層之水平與垂直透水係數(k_{h_filter} 、 k_{v_filter})、水平濾層之透水係數($k_{filter2}$)四個待定變數值之比較。其結果可看出 10 個最佳和弦之 $k_{filter2}$ 與真實值最為相近，而其他三個待定變數值與原設計值亦在同一乘冪(order)，其差值約在一個調整幅度範圍($bw=2$ 單位)內，四個待定變數值對於目標函數影

響敏感性之大小排列順序為： $k_filter2 > k_h_filter > k_v_filter > k_h_shell2$ 。

由表 4.5 亦可看出。敏感性愈高之待定變數值標定後之值傾向於愈接近真實值。

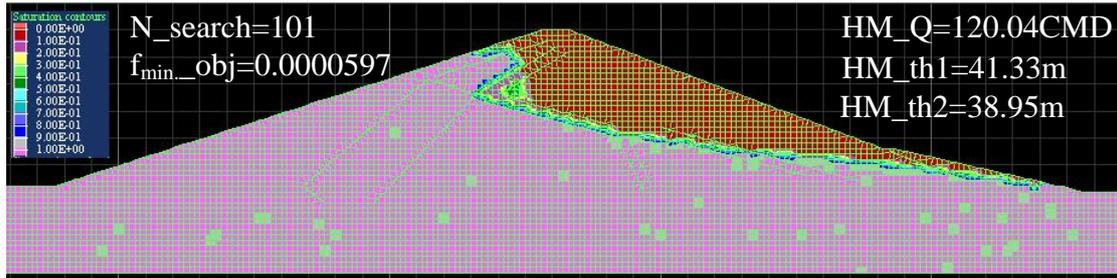


圖 4.14 新山壩案例之 HM 最佳搜尋結果之飽和度圖

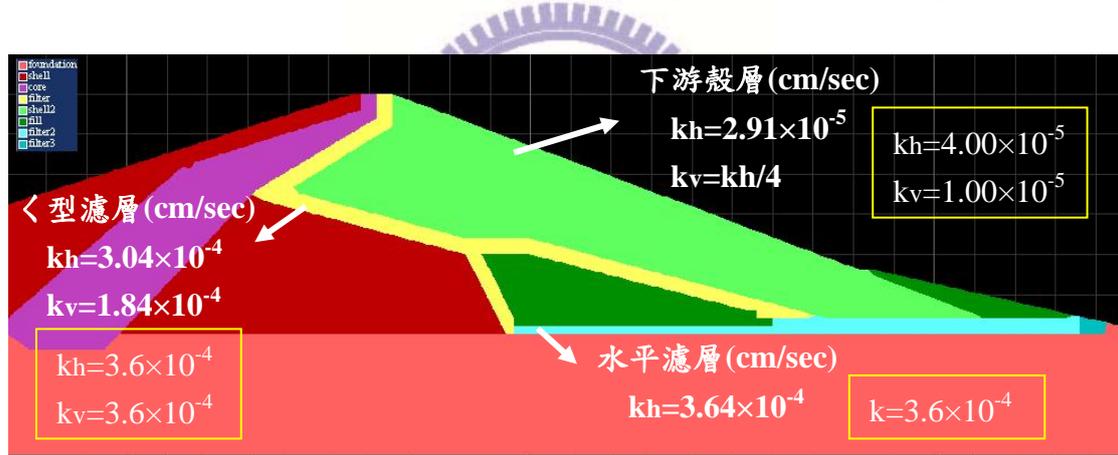


圖 4.15 新山壩案例之 HM 最佳搜尋結果之壩材變數圖

表 4.5 新山壩案例之原設計值與最佳 HM₃₅₀ 之比較

	f_obj	Q(CMD)	th1(m)	th2(m)	k _h _shell2 (cm/sec)	k _h _filter (cm/sec)	k _v _filter (cm/sec)	k_filter2 (cm/sec)
原設計值	0	119.18	41.22	38.95	4.00×10 ⁻⁵	3.60×10 ⁻⁴	3.60×10 ⁻⁴	3.60×10 ⁻⁴
1 _{N=101} _HM ₃₅₀	0.0000597	120.04	41.33	38.95	2.91×10 ⁻⁵	3.04×10 ⁻⁴	1.84×10 ⁻⁴	3.64×10 ⁻⁴
2 _{N=151} _HM ₃₅₀	0.0000626	120.04	41.35	38.96	2.91×10 ⁻⁵	3.04×10 ⁻⁴	1.52×10 ⁻⁴	3.64×10 ⁻⁴
3 _{N=289} _HM ₃₅₀	0.0000719	120.18	41.19	38.98	5.86×10 ⁻⁵	4.82×10 ⁻⁴	1.52×10 ⁻⁴	3.56×10 ⁻⁴
4 _{N=300} _HM ₃₅₀	0.0000820	118.78	41.36	39.25	8.81×10 ⁻⁵	4.82×10 ⁻⁴	2.40×10 ⁻⁴	3.27×10 ⁻⁴
5 _{N=288} _HM ₃₅₀	0.000101	118.02	41.28	39.03	5.01×10 ⁻⁵	3.91×10 ⁻⁴	2.74×10 ⁻⁴	3.56×10 ⁻⁴
6 _{N=178} _HM ₃₅₀	0.000105	120.37	41.29	39.01	3.98×10 ⁻⁵	4.36×10 ⁻⁴	2.58×10 ⁻⁴	3.56×10 ⁻⁴
7 _{N=133} _HM ₃₅₀	0.000108	118.02	41.10	38.86	5.48×10 ⁻⁵	2.32×10 ⁻⁴	2.18×10 ⁻⁴	3.64×10 ⁻⁴
8 _{N=141} _HM ₃₅₀	0.000142	118.02	40.94	38.90	9.11×10 ⁻⁵	4.22×10 ⁻⁴	2.58×10 ⁻⁴	3.54×10 ⁻⁴
9 _{N=196} _HM ₃₅₀	0.000143	118.02	40.94	38.89	8.71×10 ⁻⁵	4.22×10 ⁻⁴	2.49×10 ⁻⁴	3.56×10 ⁻⁴
10 _{N=247} _HM ₃₅₀	0.000151	120.29	40.91	38.84	7.27×10 ⁻⁵	5.76×10 ⁻⁴	1.84×10 ⁻⁴	3.62×10 ⁻⁴
HM ₃₅₀ 平均值	0.000103	119.18	41.169	38.967	6.01×10 ⁻⁵	4.05×10 ⁻⁴	2.14×10 ⁻⁴	3.56×10 ⁻⁴

4.3 小結

由鯉魚潭壩案例驗證結果顯示：

1. 目標函數收斂性佳；
2. 以總滲流量作為目標函數因子，其收斂效果相當良好；
3. 假設之心層與殼層透水係數為待定變數，經迭代 130 次後，均收斂至真實值；
4. 最佳和弦之結果顯示，壩材設計變數值與真實值相近，因此可看出最佳解並無陷入局部解情形；
5. 心層與殼層之待定變數範圍差均為 10 的 2 次方，且滲透係數以科學記號表示至小數點以下第二位，因此共有 1800×1800 個組合。本研究最佳化演算法因考慮一個組合需藉由滲流分析軟體計算一次，且分析時間一小時約計算五個組合，因此以一迭代產生一個和弦方式來求解。鯉魚潭壩案例共搜尋迭代了 130 次，即可得到與原始設計值相近之結果，此可說明和弦搜尋最佳化演算法之求解收斂性能相當好。

由新山壩案例驗證結果顯示：

1. 目標函數收斂性佳；
2. 以總滲流量與總水頭作為目標函數因子，其收斂效果相當良好；

3. 假設之下游殼層、 \angle 型濾層與水平濾層之透水係數為待定變數，經迭代 350 次後，材料之透水係數收斂速度：以水平濾層收斂性最快，其次為 \angle 型濾層，最後為下游殼層。可見水平濾層對於總滲流量與總水頭因子之收斂性有直接的影響性；而 \angle 型濾層之水平與垂直透水性比值趨近於 2，與原設計之比為 1:1 有些差異，其中以水平透水係數與真實值較接近，對於三個目標因子影響力僅次於水平濾層；最後以下游殼層對於目標函數值影響性為最低，推測可能原因為：下游殼層滲透係數之大小對於總壩體滲流量影響不大，對於浸潤面之高低(即兩處水位井之水位)較有直接影響性。
4. 以最佳和弦記憶中之各待定變數平均值與各對應之真實值比較，其差值均約為一個調整幅度範圍($bw=2$ 單位)內，因此，並無明顯陷入局部解中之情形。
5. 各待定變數範圍差均為 10 的 2 次方，且滲透係數以科學記號表示至小數點以下第二位，因此共有 $1800 \times 1800 \times 1800 \times 1800$ 個組合。新山壩案例共搜尋迭代了 350 次，且於第 301 次後就沒有更新，即可得到與真實值相近之結果，此可說明和弦搜尋最佳化演算法之求解收斂性能相當好。

最後，比較鯉魚潭壩與新山壩之變數數量與迭代次數等關係如表 4.6，鯉魚潭壩案例有 2 個變數值共迭代 130 次；新山壩案例為 4 個變數值，迭代 350 次。由此可看出，當變數值變多，所需達到目標函數值之迭代搜尋次數也會相對增加，因此變數數量與迭代次數是成正相關。不過，值得注意的是 HS 最佳化演算法並非如傳統最佳化求解法，容易因變數增加而使迭代次數呈指數上升。

表 4.6 鯉魚潭壩與新山壩案例模擬比較

項目 \ 案例	鯉魚潭壩	新山壩
待定變數數量	2	4
最大迭代次數	130	350
目標函數因子數量	1	3

綜合以上結果顯示，本研究所研擬之和弦搜尋(HS)最佳化演算法，以簡單原理並使用一些基本數學技巧之條件給定方式，可使 HS 演算法於函數值搜尋速度與收斂性能之優點充分表現出來，下一章將繼續對新山壩實際案例擬定之兩種情境做進一步的最佳化反算分析之研究。

第五章 和弦搜尋法反算 – 新山壩案例

本章以新山土石壩為例，分別以兩個不同假設情境(以下簡稱「情境」)進行和弦搜尋最佳化演算法之反算分析，探索可能之透水路徑，以符合觀察之下游壩面滲漏點位置與下游殼層之水頭量測。

情境 1：

假設新山壩壩體下游殼層內存在一高透水路徑，此高透水路徑之透水係數為已知，且路徑厚度均固定為 2m (等於一網格厚度大小)，路徑之幾何路線以二次函數表示為變數形式。下游壩面滲漏點位置與滲漏出水量已知。

情境 2：

假設新山壩壩體下游殼層內存在一高透水路徑，此高透水路徑之透水係數為已知，路徑之幾何路線以二次函數表示為變數形式，且設定其厚度範圍為{2, 4, 6, 8, 10} m 之離散變數，其中路徑厚度不隨 x 方向之增減而變化。除了下游壩面滲漏點位置與滲漏出水量已知，下游殼層內有三處之水頭量測值亦已知。

以上兩種情境之最佳化反算分析中，均藉由比較 FLAC 分析之結果與已知觀測數據，由各項差值正規化後之平方和以計算目標函數值。

但情境 1 與情境 2 所考慮之目標因子與限制條件略有不同。5.1 節說明情境 1 之反算分析結果；5.2 節說明情境 2 之反算分析結果；5.3 節為新山壩案例反算分析研究結果之綜合討論；最後 5.4 節為新山壩案例現況之綜合探討。表 5.1 為新山壩體中各部分材料所假設之透水係數，參考陳冠亨(2006)與國立交通大學報告(2010)並進行透水係數逆推分析之結果。

表 5.1 新山壩體材料之透水係數（單位：cm/sec）

材料	基礎	心層	上游殼層	雜項填方	下游殼層	〈型濾層	水平濾層	高透水路徑
k_h	1×10^{-5}	4.16×10^{-6}	7.6×10^{-5}	6×10^{-5}	4×10^{-5}	3.6×10^{-4}	1.44×10^{-2}	3.5×10^{-2}
k_v		1.04×10^{-6}	1.9×10^{-6}	1.5×10^{-5}	1×10^{-5}		7.2×10^{-3}	

5.1 情境 1 反算分析結果

表 5.2 為情境 1 之目標因子觀測值，其中距離之目標因子考慮高透水路徑在下游殼層之下游坡面平台 EL.46m 出露，因此，以觀測之平台出水點座標(X, Y)=(379.75m, 46.0m)與固定參考之基準點座標(X, Y)=(465.0m, 30.0m)之距離作為目標觀測值。

表 5.2 方案 1 之目標因子觀測值

目標因子	目標觀測值
平台出水點與基準點之距離，m	77.91
平台滲流量，CMD	0.5

圖 5.1 為迭代次數與和弦記憶(HM)之平均目標函數值之關係圖，共搜尋了 200 次，最後 HM 之目標函數平均值約收斂至 0.50004。圖 5.2 為迭代次數與 HM 之各目標因子平均值之關係圖，其中距離目標因子搜尋 32 次之後的 HM 平均值，均在目標觀測值 77.91 m 上下；滲流量目標因子計算值均為 0 CMD。圖 5.3 為每次迭代產生之目標距離值與其次數之統計資料，記錄最多次數之距離為 75m 至 80m，共出現 46 次。

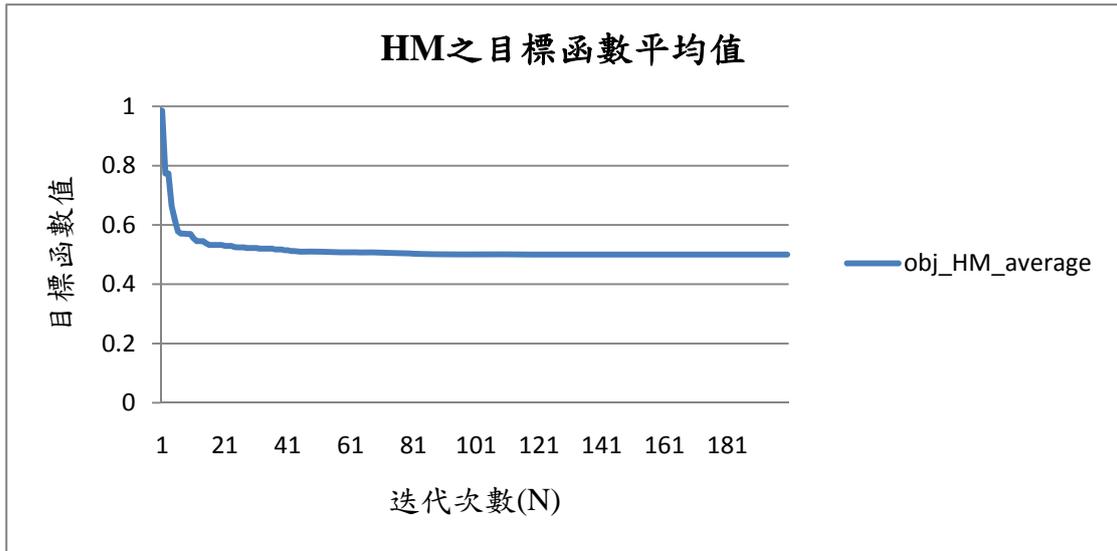


圖 5.1 情境 1 之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖

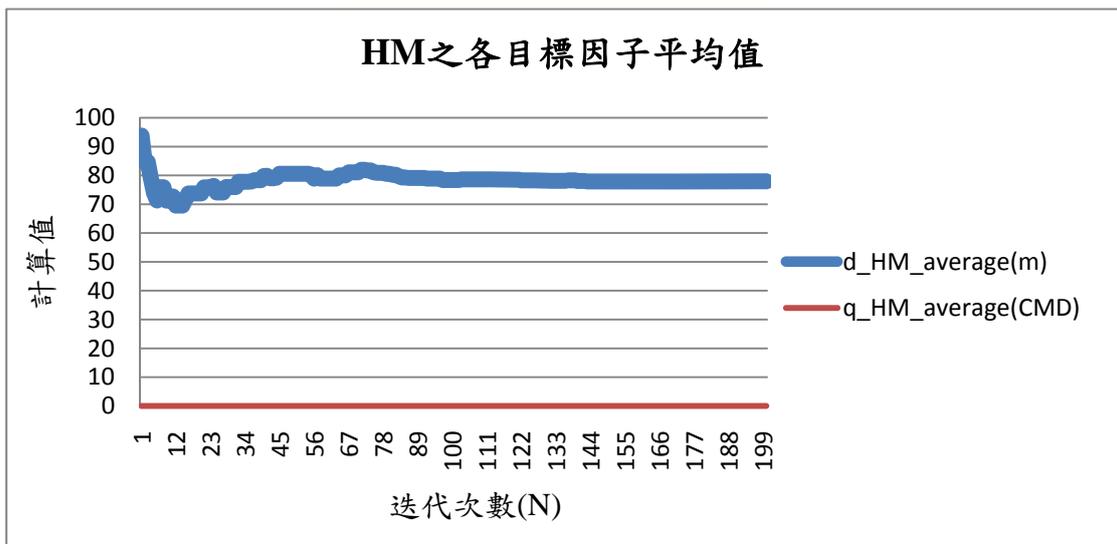


圖 5.2 情境 1 之迭代次數與 HM 各目標因子之關係圖

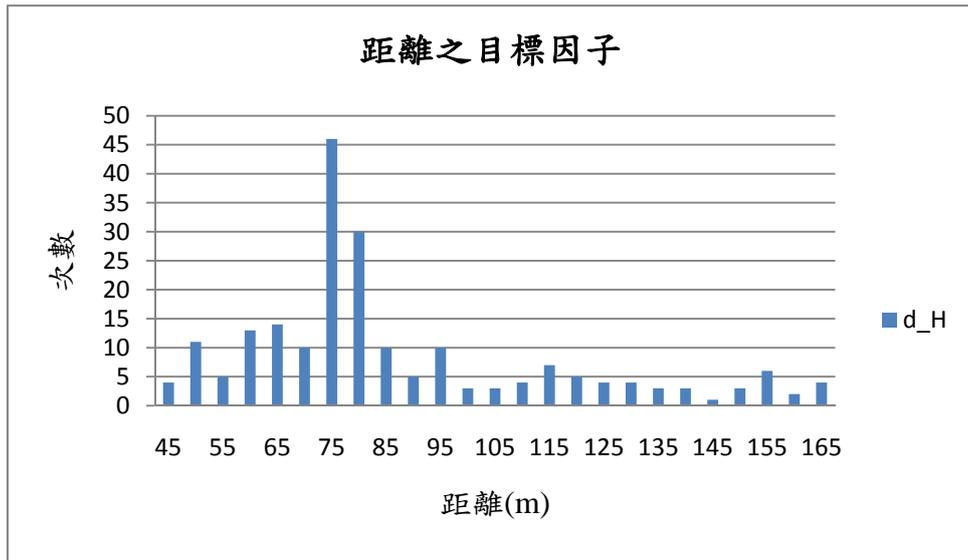


圖 5.3 情境 1 之目標因子距離與次數之關係圖

圖 5.4 至圖 5.13 為材料分區圖與右上角對應之飽和度圖，和弦記憶大小為 10 (HMS=10) 之初始和弦記憶(HM₀)，其中 HM₀ 之 10 個和弦(H)係依隨機產生之順序排序。以 5_HM₀ 為例，代表 10 個初始和弦記憶中的第五個隨機產生之和弦。

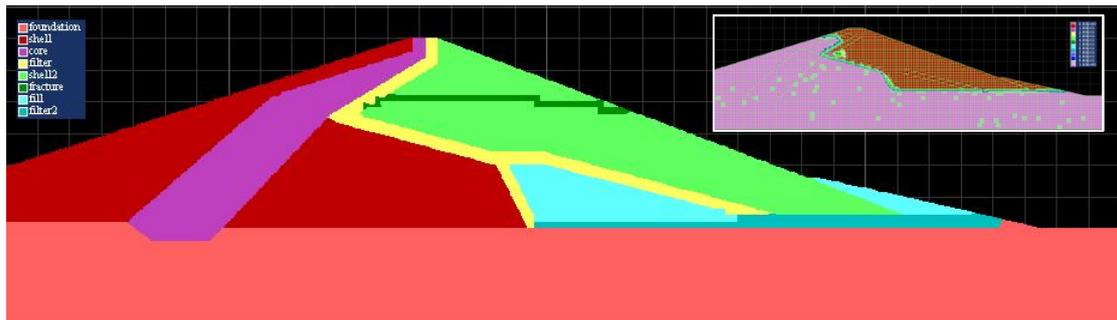


圖 5.4 情境 1 之 1_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

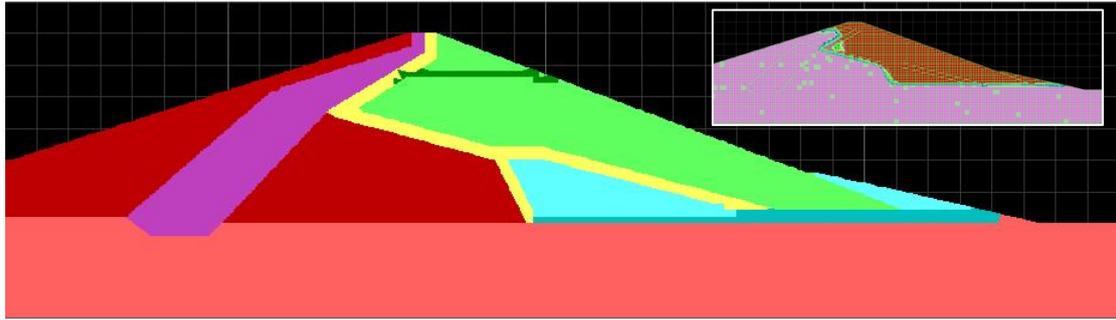


圖 5.5 情境 1 之 2_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

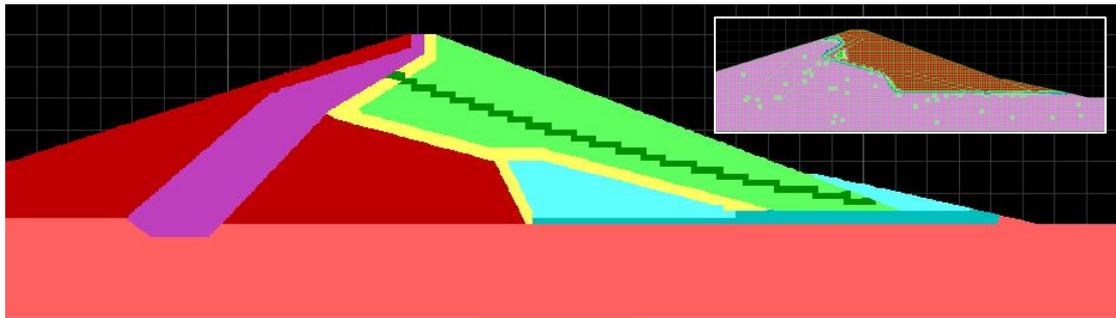


圖 5.6 情境 1 之 3_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

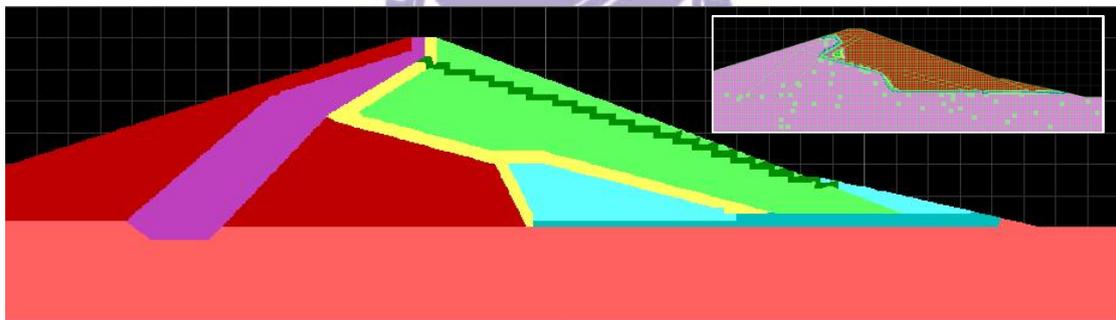


圖 5.7 情境 1 之 4_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

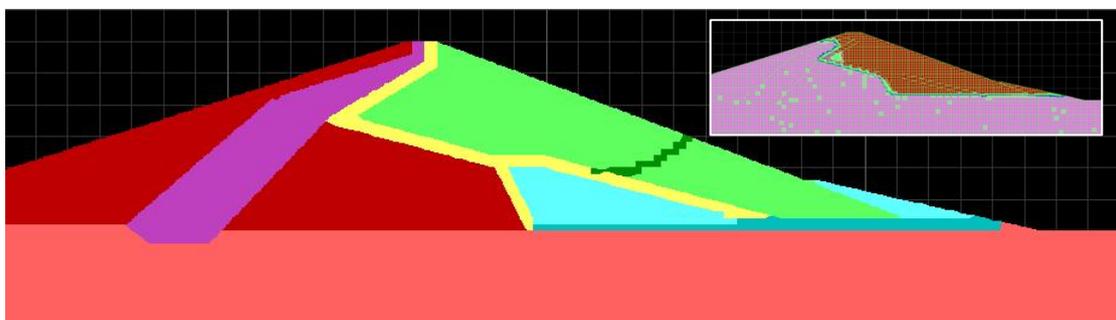


圖 5.8 情境 1 之 5_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

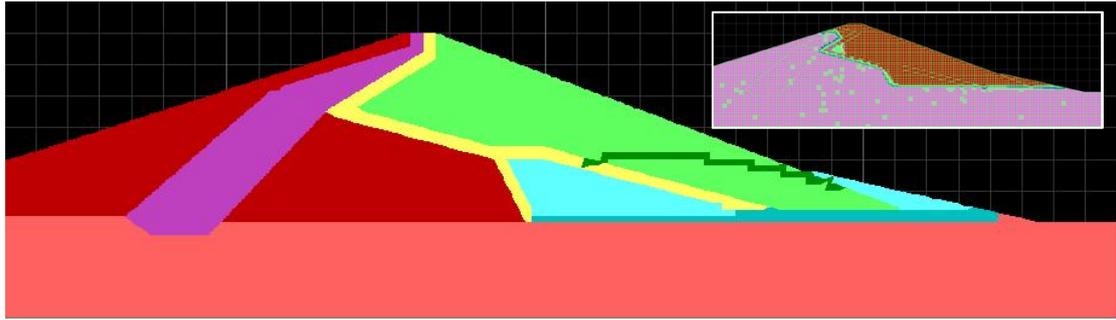


圖 5.9 情境 1 之 6_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

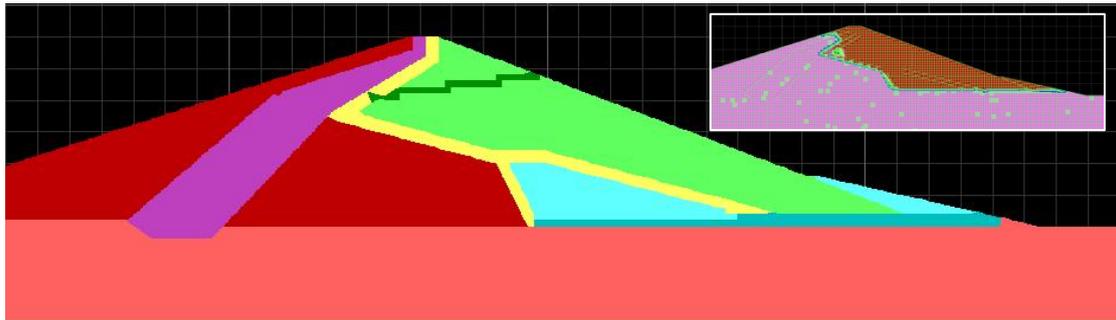


圖 5.10 情境 1 之 7_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

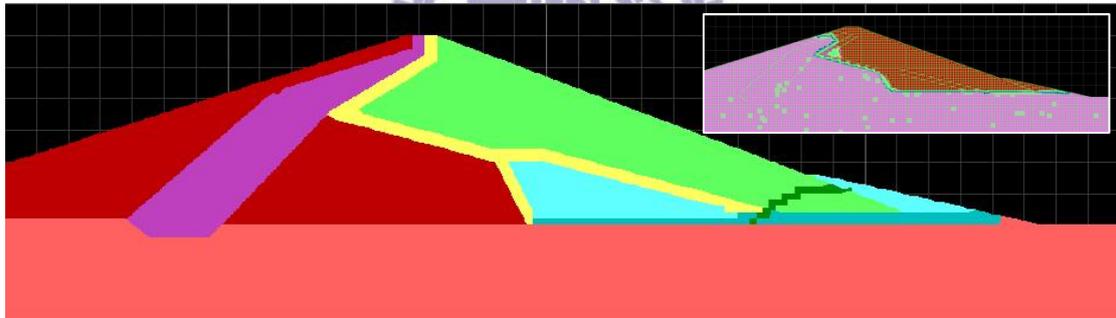


圖 5.11 情境 1 之 8_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖



圖 5.12 情境 1 之 9_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

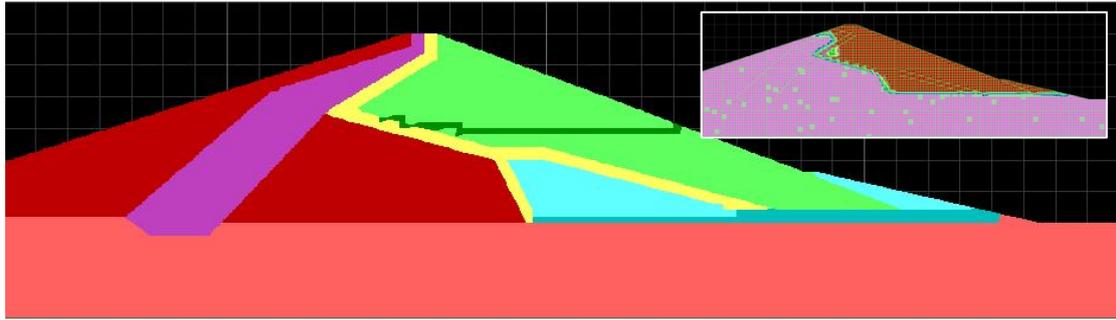


圖 5.13 情境 1 之 10_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

迭代 200 次(N=200)之後的和弦記憶(HM₂₀₀),依目標函數值(f_obj)由大至小順序排列之材料分區圖與其右上角為對應之飽和度圖,依序表示為圖 5.14 至圖 5.23,其中標示於圖左上方之 f_obj 為當次迭代所產生之目標函數值,函數值越小表示與目標觀測值越接近。

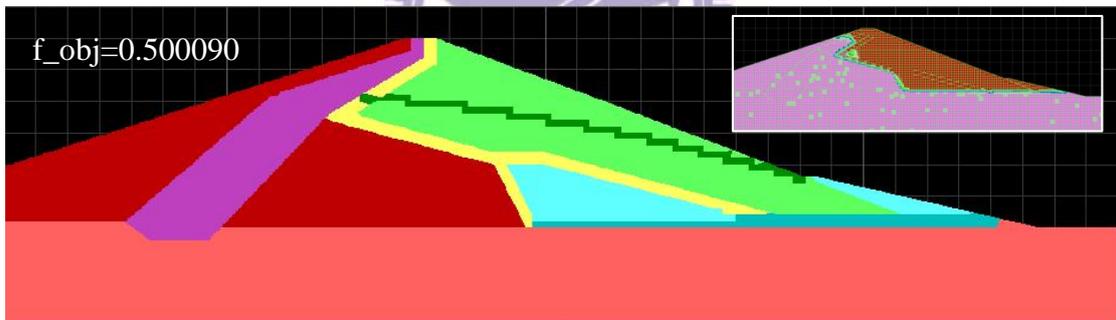


圖 5.14 情境 1 之 HM₂₀₀ 之材料分區與飽和度分布圖(N=171)

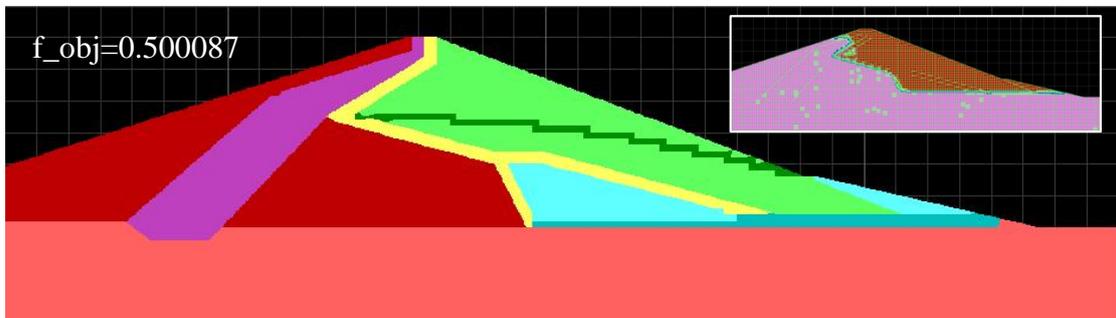


圖 5.15 情境 1 之 HM₂₀₀ 之材料分區與飽和度分布圖(N=173)

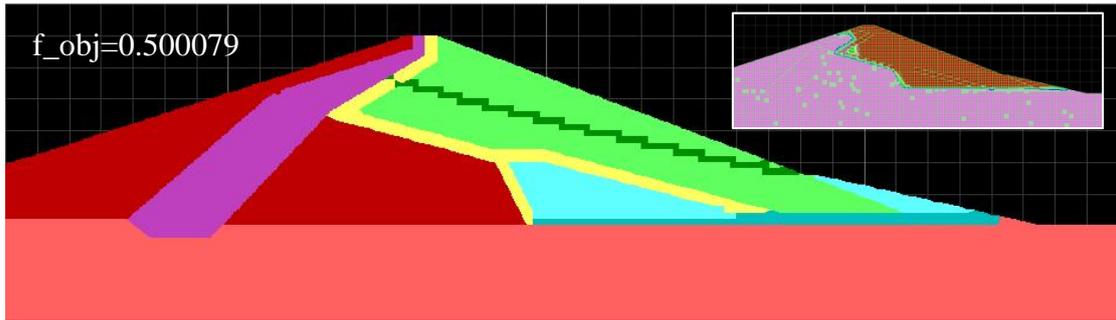


圖 5.16 情境 1 之 HM_{200} 之材料分區與飽和度分布圖(N=175)

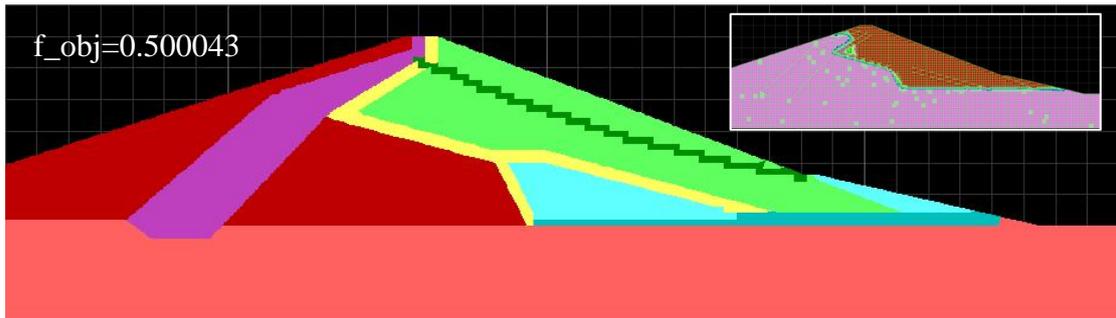


圖 5.17 情境 1 之 HM_{200} 之材料分區與飽和度分布圖(N=83)

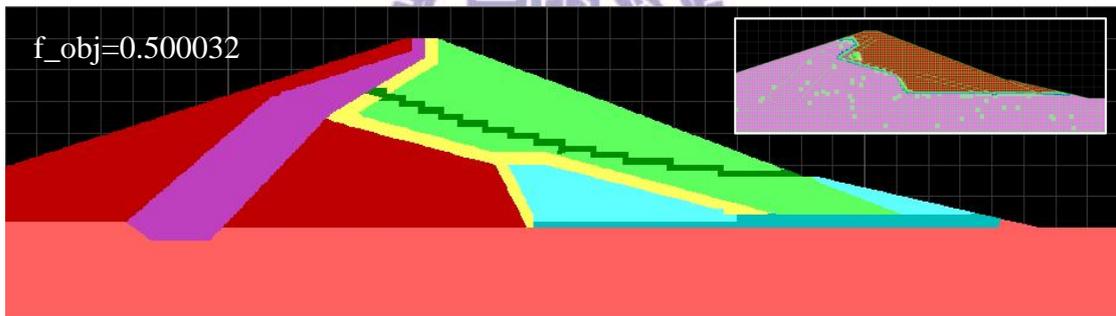


圖 5.18 情境 1 之 HM_{200} 之材料分區與飽和度分布圖(N=137)

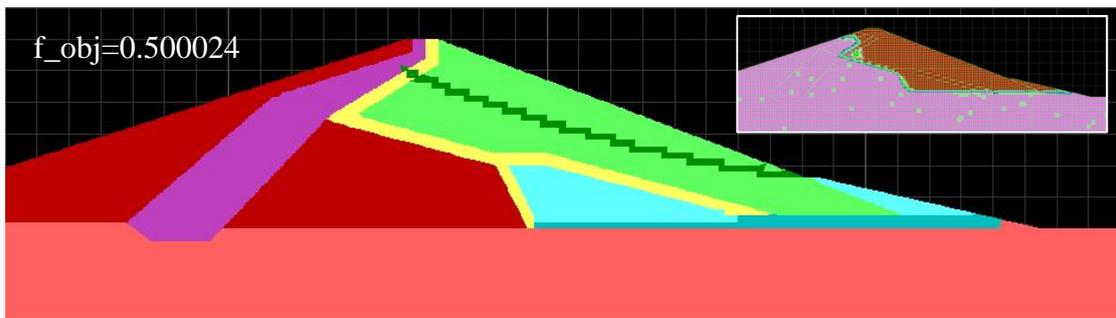


圖 5.19 情境 1 之 HM_{200} 之材料分區與飽和度分布圖(N=103)

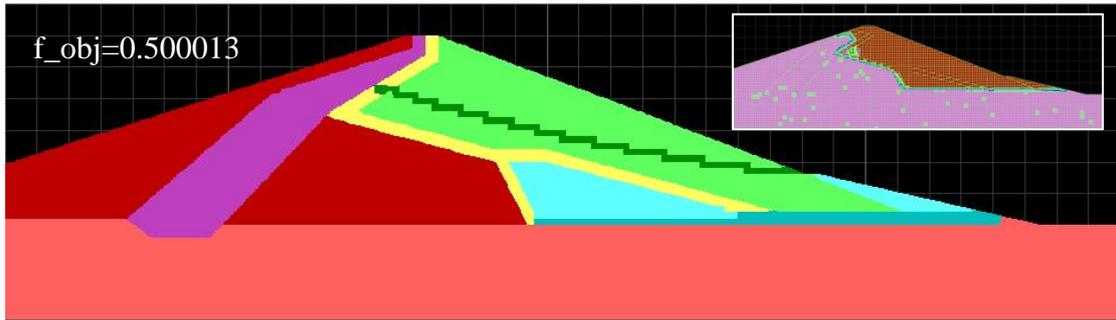


圖 5.20 情境 1 之 HM_{200} 之材料分區與飽和度分布圖(N=42)

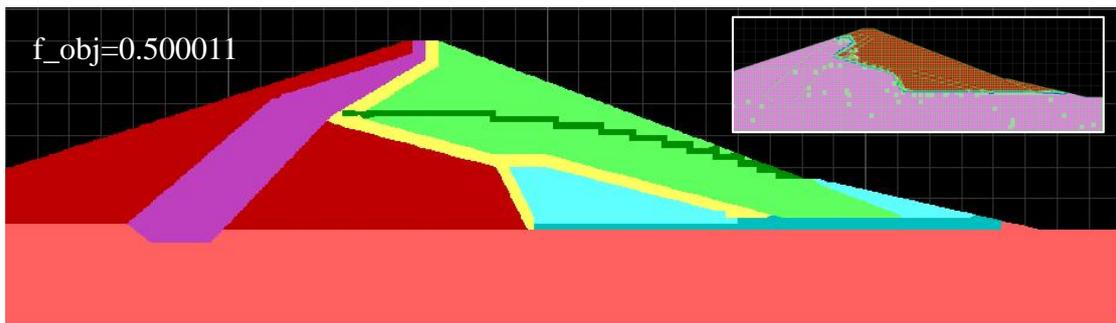


圖 5.21 情境 1 之 HM_{200} 之材料分區與飽和度分布圖(N=122)

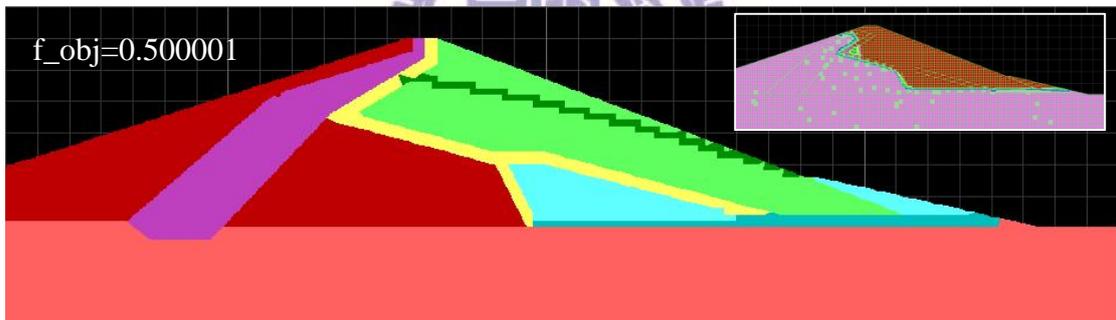


圖 5.22 情境 1 之 HM_{200} 之材料分區與飽和度分布圖(N=194)

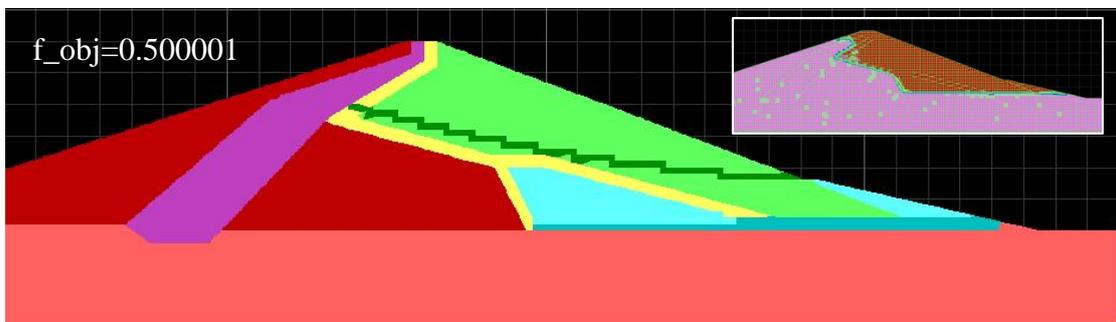


圖 5.23 情境 1 之 HM_{200} 之材料分區與飽和度分布圖(N=130)

5.2 情境 2 反算分析結果

表 5.3 為情境 2 中目標函數各目標因子觀測值與水位觀測井水位(壓)計之埋設高程，其中距離之目標因子考慮高透水路徑在下游殼層之下游坡面平台 EL.46m 出露，因此，以觀測之平台出水點座標(X, Y)=(379.75m, 46.0m)與固定參考之基準點座標(X, Y)=(465.0m, 30.0m)之距離作為目標觀測值。

表 5.3 情境 2 之目標因子觀測值

目標因子	目標觀測值	位置高程(m)
平台出水點與基準點之距離，m	77.91	—
平台滲流量，CMD	0.5	—
水位觀測井總水頭(#1)，m	53	EL.52.005
水位觀測井總水頭(#2)，m	48.5	EL.47.056
水位觀測井總水頭(#3)，m	43	EL.40.926

圖 5.24 為迭代次數與和弦記憶(HM)之平均目標函數值之關係圖，共搜尋了 115 次，最後 HM 函數平均值約收斂至 0.50366。圖 5.25 為迭代次數與 HM 中之各目標因子平均值之關係圖，其中距離目標因子搜尋第 40 次之後的 HM 平均值，均在目標觀測值 77.91 m 上下；滲流量目標因子計算值均為 0 CMD；另外三個水位觀測井計算之孔隙水壓值均為 0，也就是總水頭等於位置高程。

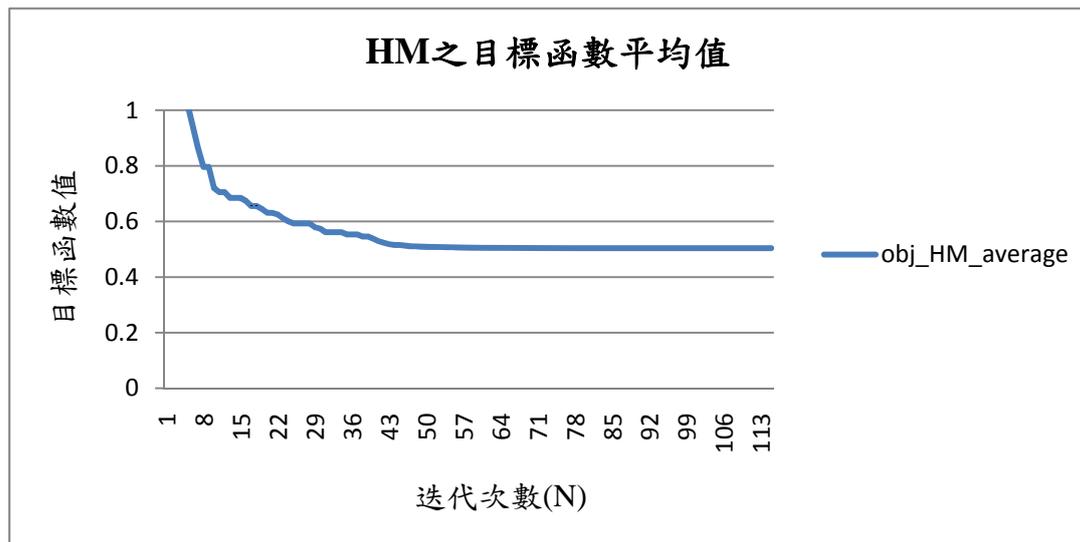


圖 5.24 情境 2 之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖

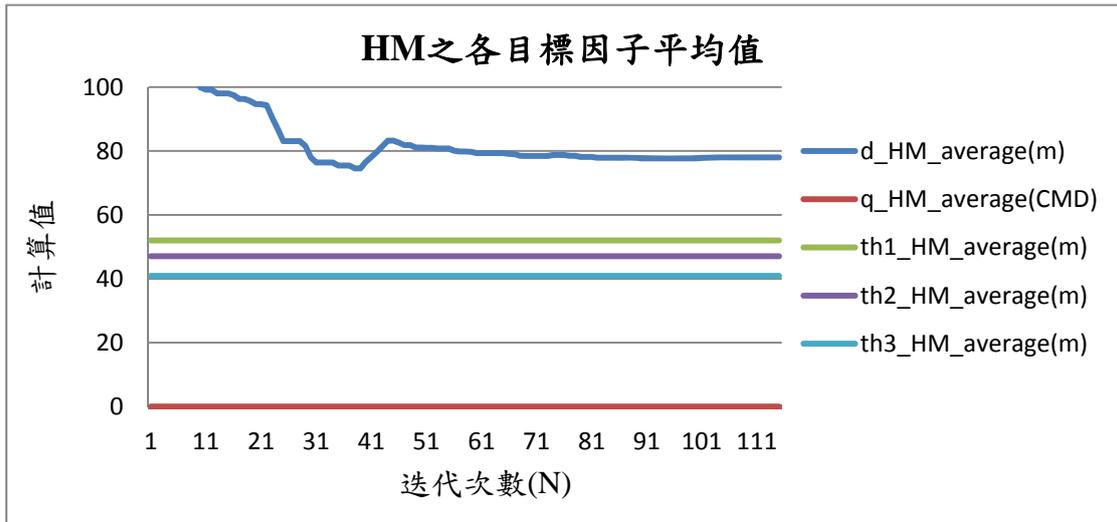


圖 5.25 情境 2 之迭代次數與 HM 各目標因子之關係圖

圖 5.26 至圖 5.35 為材料分區圖與右上角對應之飽和度圖，和弦記憶大小為 10 (HMS=10) 之初始和弦記憶(HM₀)，其中 HM₀ 之 10 個和弦(H)係依隨機產生之順序排序。

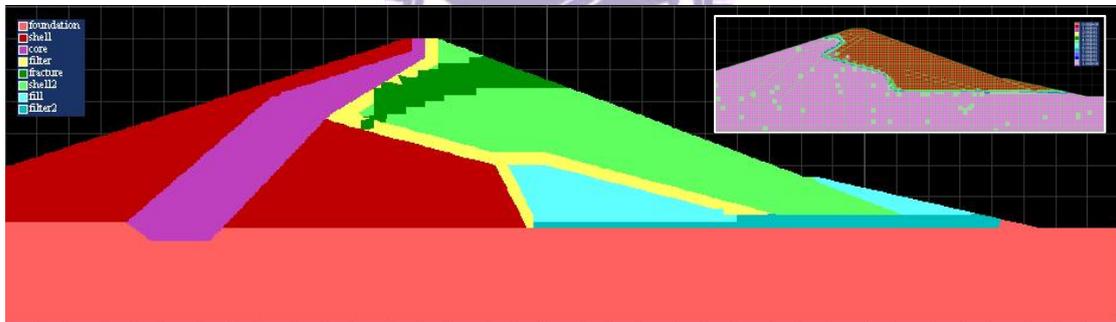


圖 5.26 情境 2 之 1_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

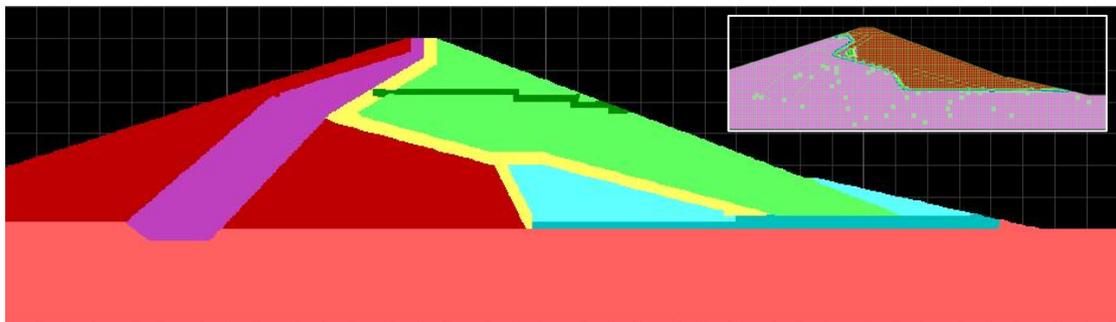


圖 5.27 情境 2 之 2_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

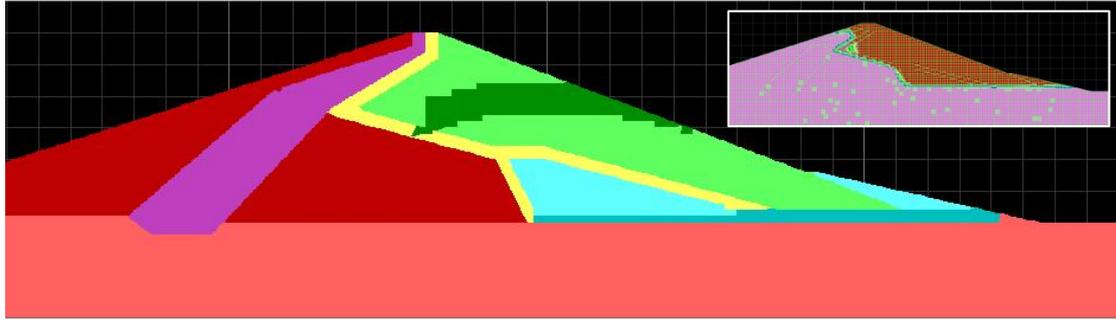


圖 5.28 情境 2 之 3_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

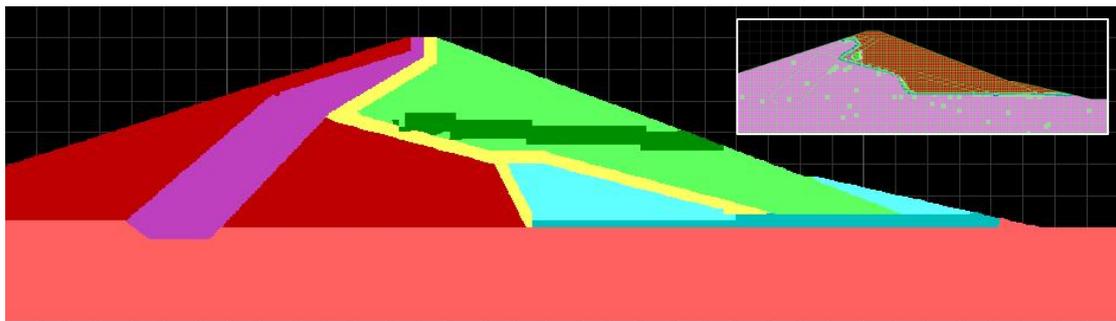


圖 5.29 情境 2 之 4_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

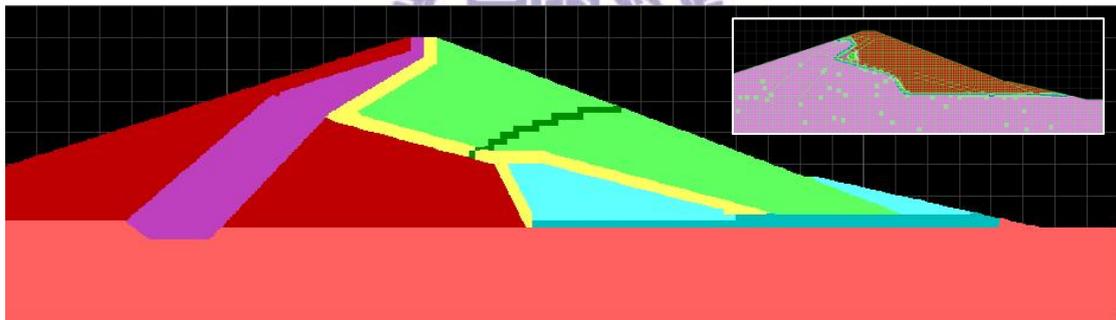


圖 5.30 情境 2 之 5_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

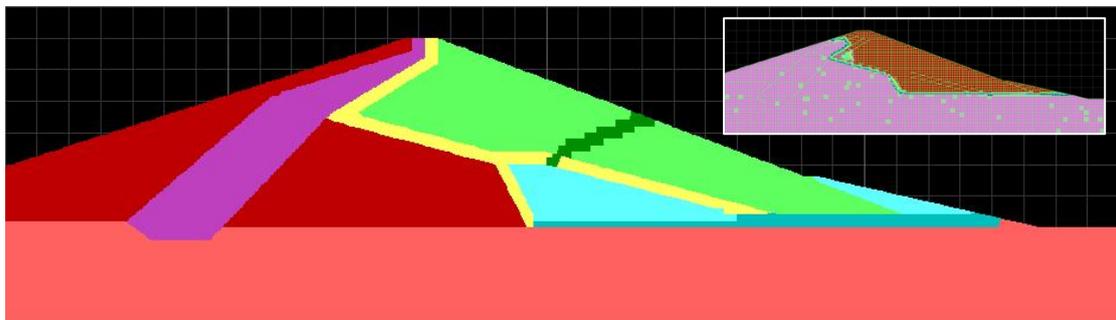


圖 5.31 情境 2 之 6_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

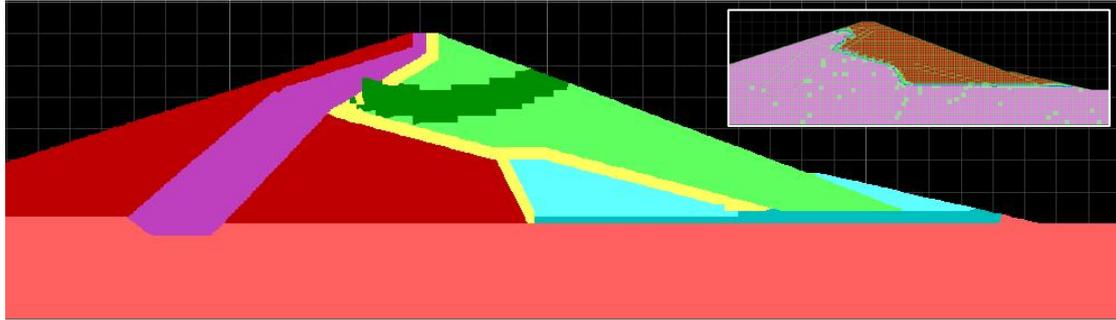


圖 5.32 情境 2 之 7_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

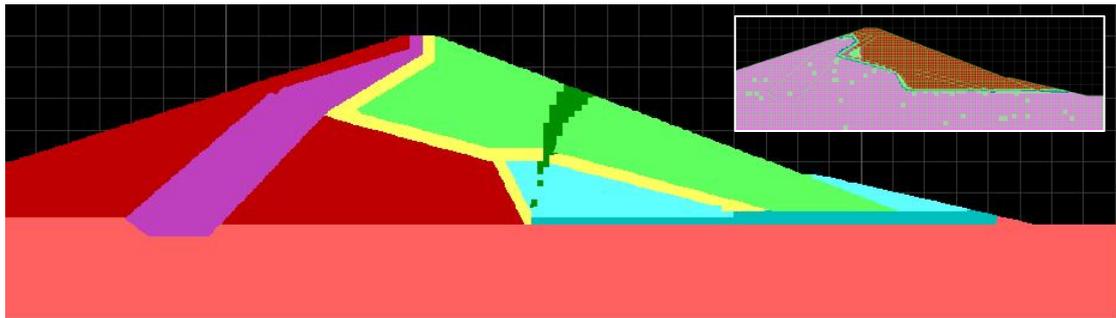


圖 5.33 情境 2 之 8_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

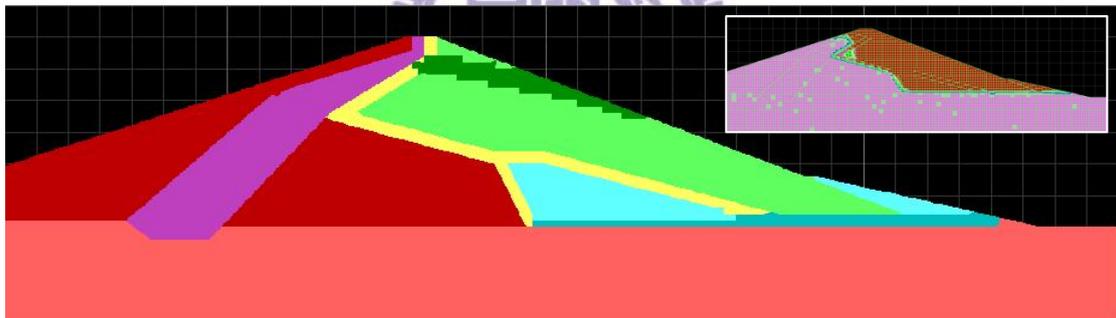


圖 5.34 情境 2 之 9_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

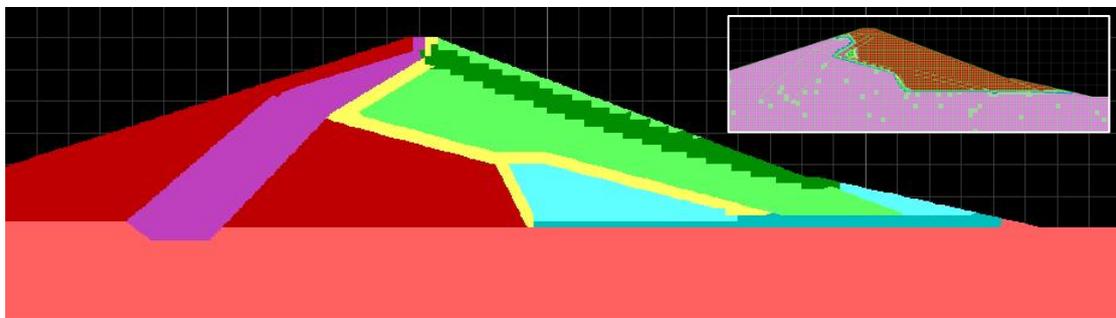


圖 5.35 情境 2 之 10_HM₀ 之材料分區與飽和度分布圖

迭代 115 次(N=115)之後的和弦記憶(HM₁₁₅),依目標函數值(f_obj)由大至小順序排列之材料分區圖與其右上角為對應之飽和度圖,依序表示為圖 5.36 至圖 5.45,其中標示於圖左上方之 f_obj 為當次迭代所產生之目標函數值,函數值越小表示與目標觀測值越接近。值得注意的是,在這十種情形下,下游側之浸潤線皆位於水平濾層,完全未進入下游殼層之內。

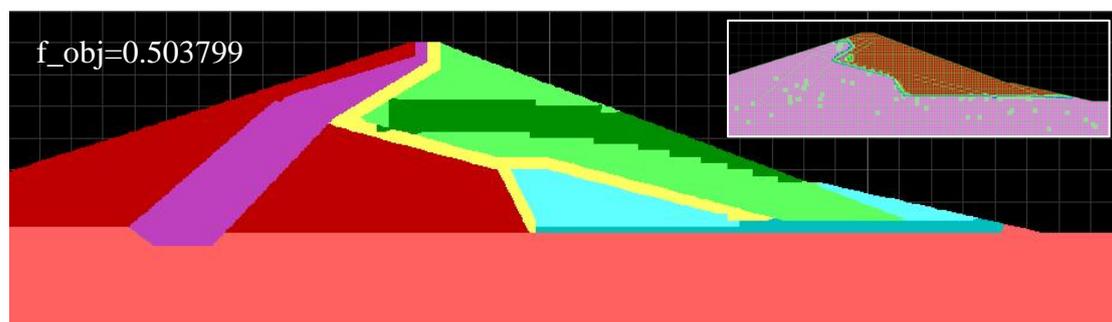


圖 5.36 情境 2 之 HM₁₁₅ 之材料分區與飽和度分布圖(N=101)

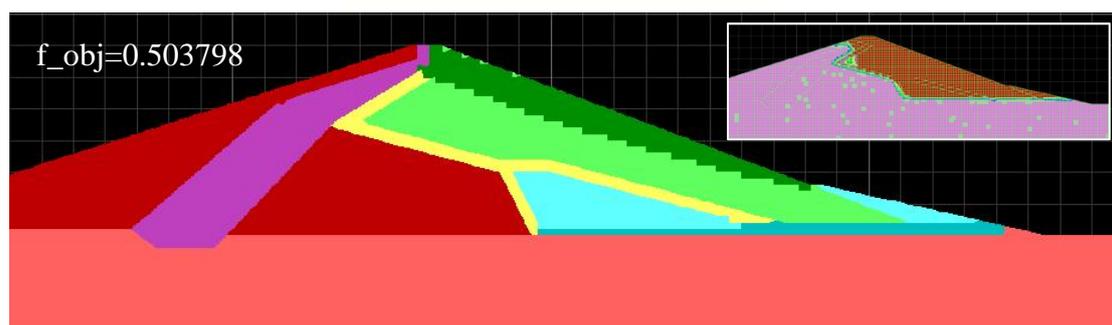


圖 5.37 情境 2 之 HM₁₁₅ 之材料分區與飽和度分布圖(N=104)

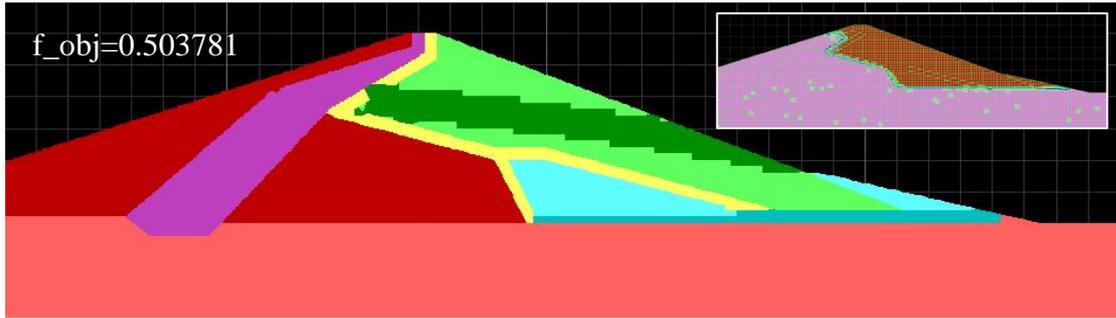


圖 5.38 情境 2 之 HM_{115} 之材料分區與飽和度分布圖(N=49)

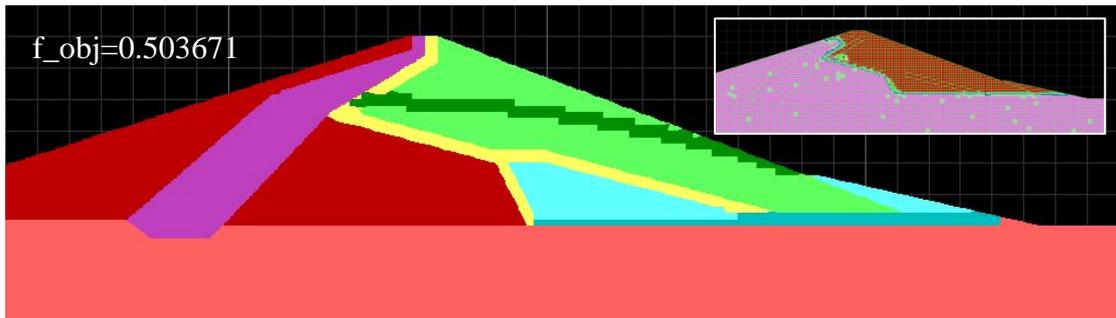


圖 5.39 情境 2 之 HM_{115} 之材料分區與飽和度分布圖(N=74)

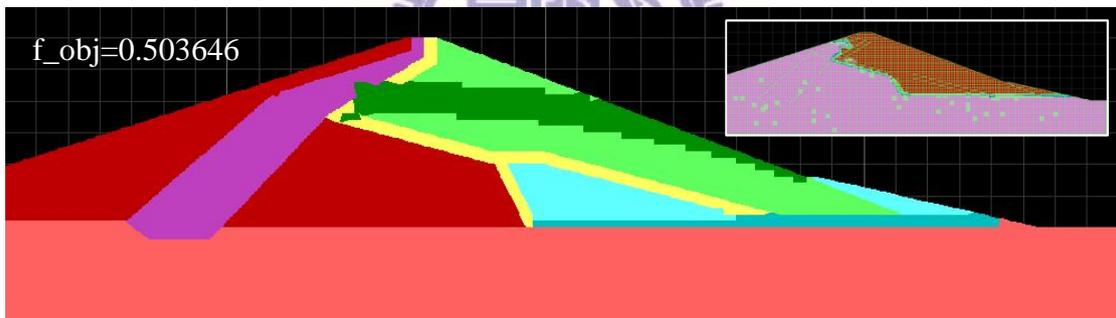


圖 5.40 情境 2 之 HM_{115} 之材料分區與飽和度分布圖(N=41)

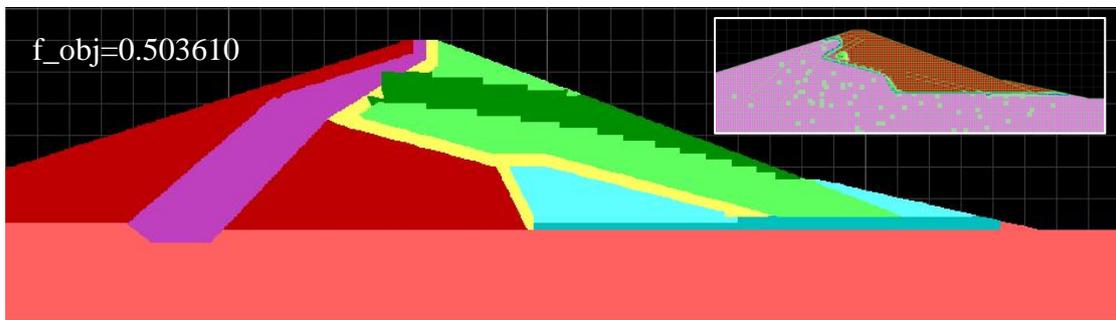


圖 5.41 情境 2 之 HM_{115} 之材料分區與飽和度分布圖(N=47)

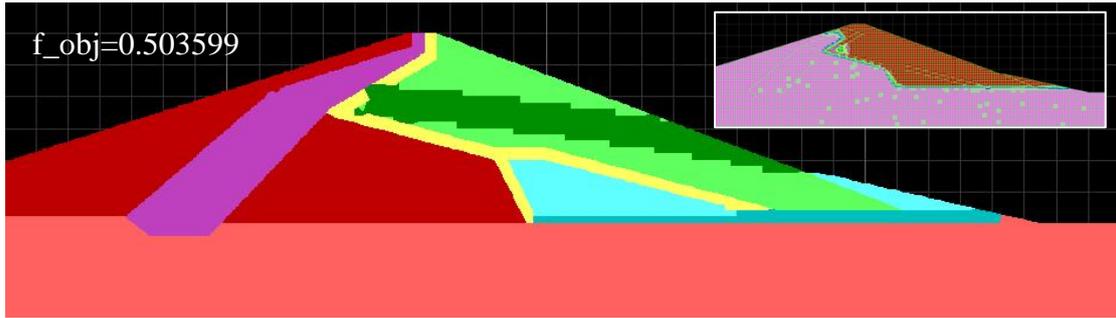


圖 5.42 情境 2 之 HM₁₁₅ 之材料分區與飽和度分布圖(N=90)

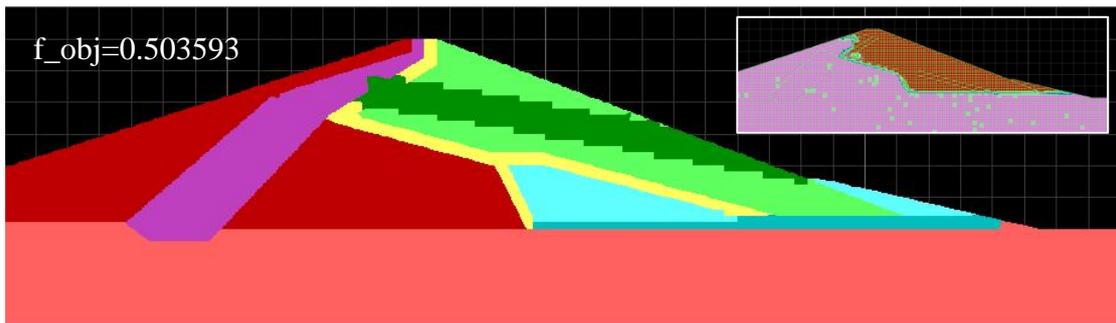


圖 5.43 情境 2 之 HM₁₁₅ 之材料分區與飽和度分布圖(N=77)

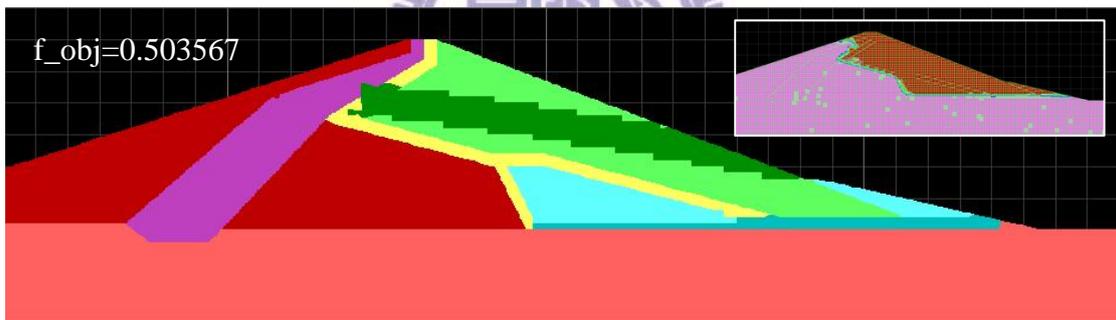


圖 5.44 情境 2 之 HM₁₁₅ 之材料分區與飽和度分布圖(N=103)

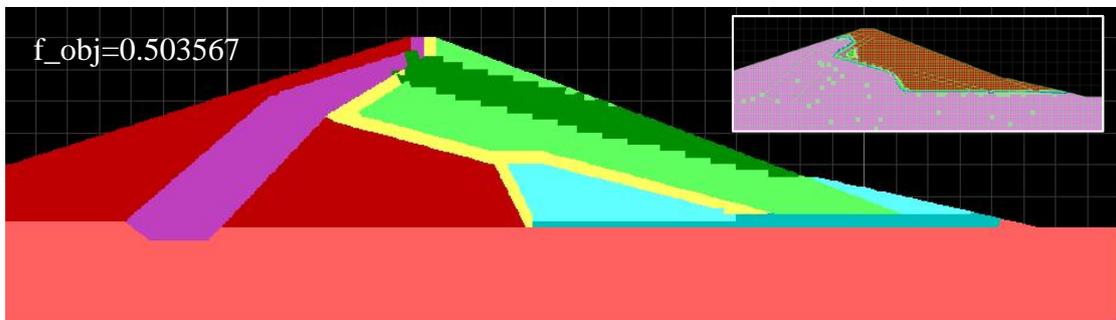


圖 5.45 情境 2 之 HM₁₁₅ 之材料分區與飽和度分布圖(N=60)

5.3 結果與討論

本研究所擬定之兩種情境主要是依據新山壩實際案例進行模擬，希冀能透過最佳化演算法之反算分析，來模擬壩體 Sta.0+170m 之橫斷面所觀察到下游殼層之下游邊坡平台處附近出現滲漏水現象之可能原因，因此假設下游殼層存在一高透水路徑（簡化表示為二次函數式）。其中情境2額外再考慮下游殼層水位觀測井之水位（水頭）資料，並假設高透水路徑可能為下游殼層內的一條高透水帶，允許路徑厚度範圍為{2, 4, 6, 8, 10} m 之一的離散變數形式。

由 5.1 節與 5.2 節之兩情境之反算分析結果顯示：

1. 目標函數收斂性佳；
2. 滲出點距離之目標因子主導目標函數之收斂性；
3. 飽和度圖均顯示浸潤面並無上升至下游殼層，因此情境2計算出下游殼層三個水位觀測井之計算孔隙水壓均為零（即總水頭等於高程水頭），且下游殼層之下游邊坡平台處(EL.46m)之滲水量也為零。
4. 由二次函數所表示之高透水路徑，是以三個座標點所產生（詳見第三章 研究方法），表示路徑幾何形狀為二次函數之三個係數（設計變數），另外，情境2額外考慮路徑厚度隨 x 方向之增減為定值之離散變數。反算結果顯示主控因子為滲出點位置之座標點：

出 (x_{end}, y_{end})，因此，其它變數對於目標函數因子之最佳化求解上，幾乎不具任何影響。

5. 情境 1 最佳目標函數值為 0.500001，情境 2 最佳目標函數值為 0.503567，兩者目標函數值 0.5 之數值即為滲流量目標因子之權重 ($\alpha_q = 0.5$)，而情境 2 目標函數值 0.003565 之數值則為三個水位觀測井計算產生之數值。
6. 由於情境 2 額外限制高透水路徑，必須在三個水位觀測井間之水位以上，因此情境 2 迭代次數 ($N=115$) 明顯比方案 1 ($N=200$) 少。

由以上討論可推論，假設下游殼層內的高透水通路之情境，並無法解釋下游邊坡平台處 (EL.46m) 之滲出水以及下游殼層三個水位觀測井之實測水頭 (均低於下游壩面平台處之高程 EL.46m)。下游邊坡平台處 (EL.46m) 之滲出水顯著高於浸潤面。據此，應可排除下游殼層內的高透水通路造成下游壩面平台處滲出水，應與浸潤面並無關連 (因此應非來自水庫之滲漏水)，較可能為下游殼層中因為材料透水性不盡均勻，下雨入滲後留在低透水性殼層材料之棲止水，慢慢迂迴經過較為透水之通路流出。然而，下游殼層三個水位觀測井之實測水頭皆顯著高於水平濾層高程，顯然浸潤面部分進入下游殼層之內，其可能原因仍值得進一步探討，將於下一節就其可能原因繼續探討。

5.4 新山壩案例現況之綜合探討

首先，本研究案例假設新山壩體下游殼層有一高透水路徑，並以兩種不同情境進行和弦搜尋最佳化反算，其結果顯示：水流均順沿著濾層通道，往下游壩址排出，並無上升至下游殼層，致使下游殼層觀測井處之水頭值為零，理所當然的高透水通道於下游殼層內無論如何變動，其出露點均不會有滲流水情形發生。

其次，若以情境 1 反算結果中最佳目標函數值之高透水路徑，對新山壩嘗試做局部壩材之假設條件模擬，目標是進一步測試是否可能存在某特殊條件下，可模擬出壩體下游邊坡平台處有水流出，並套疊材料分區圖與飽合度分布圖以供討論（如圖 5.46）。由圖 5.46 可看出當緊鄰高透水路徑下之濾層段若以相當極端之方式堵塞，水流如同被引導至高透水通道而流出（其計算之單位壩長滲流量為 0.48CMD；目標觀測值為 0.5CMD），並因重力作用往下浸潤，但實際壩體為三維，此種情形幾無機會發生，其可能性應予以排除。

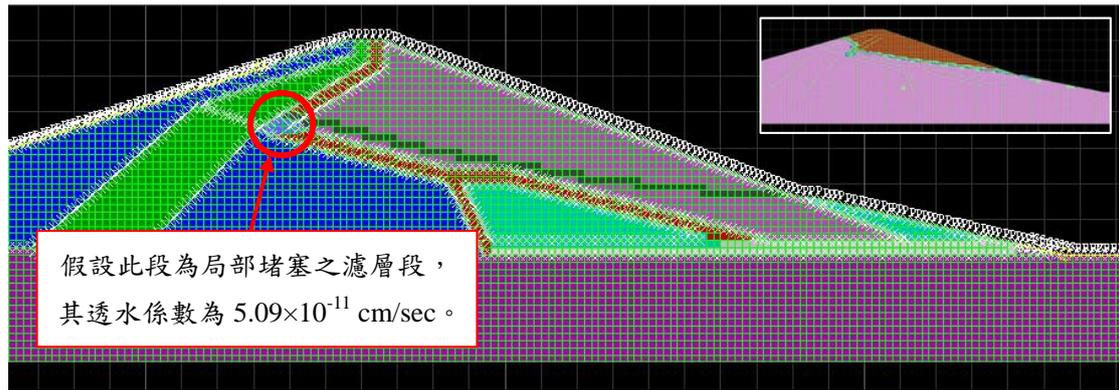


圖 5.46 模擬平台出水之材料分區與飽和度分布圖

為排除庫水滲流與壩體下游邊坡平台處流出水之可能關連性，可進而檢討新山壩由 2002 年至 2009 年間長期監測之排除降雨影響，分析庫水位與 D4 量水堰和 D2 總壩體滲流量資料(詳見第三章 圖 3.10 與圖 3.11，D4 量水堰平均滲流量約為 0.5CMD；D2 總壩體滲流量約為 130CMD)，可由連續之滲水量監測資料中擷取出符合高庫水位且排除明顯降雨之情況下，出現連續數日之極低滲漏量，甚至滲漏量為零之數據，列於圖 5.47 至圖 5.54 (擷圖自原始監測數據之 Excel 檔，資料來源：台灣省自來水公司第一區管理處)。比較結果顯示：若排除降雨影響，當多日未下雨時，由下游平台蒐集之出滲水量(D4)近乎為 0 或為 0。

B	C	E	M
儀器名稱	雨量	水庫水位高程	D4(CMD)-左
日期			
2002/7/13	0	83.86	1.526
2002/7/14	0	83.89	0.965
2002/7/15	0	83.89	1.440
2002/7/16	0	83.94	1.267
2002/7/17	0	83.99	1.080
2002/7/18	2	84.01	2.462
2002/7/19	0	84.06	0.849
2002/7/20	0	84.06	0.806
2002/7/21	0	84.07	0.720
2002/7/22	0	84.03	0.446
2002/7/23	0	84	0.360
2002/7/24	0	83.92	0.302
2002/7/25	0	83.8	0.316
2002/7/26	0	83.63	0.259
2002/7/27	0	83.5	0.374
2002/7/28	0	83.37	0.065
2002/7/29	0	83.21	0.043
2002/7/30	0	83	0.259
2002/7/31	0	82.75	0.143
2002/8/1	1	82.63	2.304

圖 5.47 D4 量水堰滲漏量(1/8)

B	C	E	M
儀器名稱	雨量	水庫水位高程	D4(CMD)-右
日期			
2003/6/26	0.00	83.15	0.562
2003/6/27	0.00	83.14	0.576
2003/6/28	0.00	83.12	0.490
2003/6/29	0.00	83.13	0.389
2003/6/30	0.00	83.12	0.259
2003/7/1	0.00	83.13	0.331
2003/7/2	0.00	83.14	0.216
2003/7/3	0.00	83.14	0.187
2003/7/4	0.00	83.08	0.173
2003/7/5	0.00	83.03	0.144
2003/7/6	0.00	82.97	0.058
2003/7/7	0.00	82.88	0.058
2003/7/8	0.00	82.75	0.072
2003/7/9	0.00	82.65	0.086
2003/7/10	0.00	82.52	0.072
2003/7/11	0.00	82.37	0.130
2003/7/12	0.00	82.18	0.100
2003/7/13	0.00	81.99	0.101
2003/7/14	0.00	81.75	0.072
2003/7/15	0.00	81.49	0.000

圖 5.48 D4 量水堰滲漏量(2/8)

B	C	E	I	M
儀器名稱	雨量	水庫水位高程	D4(CMD)-左	
日期				
2004/6/13	0.00	83.05		0.216
2004/6/14	0.00	83.05		0.346
2004/6/15	0.00	83.02		0.173
2004/6/16	0.00	83.02		0.346
2004/6/17	0.00	83.01		0.259
2004/6/18	0.00	82.99		0.072
2004/6/19	0.00	82.97		0.000
2004/6/20	0.00	82.94		0.000

圖 5.49 D4 量水堰滲漏量(3/8)

B	C	E	I	M
儀器名稱	雨量	水庫水位高程	D4(CMD)-左	
日期				
2004/6/25	0.00	82.98		0.130
2004/6/26	0.00	82.91		0.115
2004/6/27	0.00	82.81		0.115
2004/6/28	0.00	82.70		0.000
2004/6/29	2.00	82.56		0.000
2004/6/30	2.00	82.39		0.000

圖 5.50 D4 量水堰滲漏量(4/8)

B	C	E	I	M
儀器名稱	雨量	水庫水位高程	D4(CMD)-左	
日期				
2004/7/13	0.00	83.06		0.086
2004/7/14	0.00	83.03		0.086
2004/7/15	0.00	83.02		0.000
2004/7/16	0.00	82.98		0.000
2004/7/17	0.00	82.95		0.000
2004/7/18	0.00	82.96		0.000
2004/7/19	0.00	82.96		0.000
2004/7/20	0.00	82.93		0.000
2004/7/21	0.00	82.93		0.000
2004/7/22	0.00	82.94		0.000
2004/7/23	0.00	82.91		0.000
2004/7/24	0.00	82.91		0.000
2004/7/25	0.00	82.91		0.000
2004/7/26	0.00	82.76		0.000
2004/7/27	0.00	82.62		0.000
2004/7/28	0.00	82.47		0.000
2004/7/29	0.00	82.29		0.000
2004/7/30	0.00	82.11		0.000
2004/7/31	0.00	81.88		0.000
2004/8/1	0.00	81.66		0.000

圖 5.51 D4 量水堰滲漏量(5/8)

B	C	E	M
儀器名稱	雨量	水庫水位高程	D4(CMD)-左
日期			
2005/6/27	0	83.45	0.216
2005/6/28	2	83.45	0.144
2005/6/29	0.5	83.45	0.216
2005/6/30	0	83.44	0.000
2005/7/1	0	83.43	0.000
2005/7/2	0	83.41	0.000
2005/7/3	0	83.25	0.000
2005/7/4	0	83.2	0.000
2005/7/5	0	83.16	0.000
2005/7/6	0	83.07	0.000
2005/7/7	0	82.9	0.000
2005/7/8	0.5	82.79	0.000
2005/7/9	0.5	82.78	0.000
2005/7/10	0	82.78	0.000
2005/7/11	0	82.63	0.000
2005/7/12	0	82.52	0.000
2005/7/13	0	82.35	0.000
2005/7/14	0	82.2	0.000
2005/7/15	0	82.07	0.000
2005/7/16	0	81.92	0.000

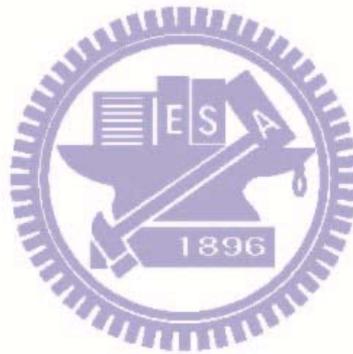
圖 5.52 D4 量水堰滲漏量(6/8)

B	C	E	M
儀器名稱	雨量	水庫水位高程	D4(CMD)-左
日期			
2008/7/19	0	82.78	0.000
2008/7/20	0	82.82	0.000
2008/7/21	0	82.88	0.000
2008/7/22	0	82.95	0.000
2008/7/23	0	82.96	0.000
2008/7/24	0	82.9	0.000
2008/7/25	0	82.79	0.000

圖 5.53 D4 量水堰滲漏量(7/8)

B	C	E	I	M
儀器名稱	雨量	水庫水位高 程	D4(CMD)-左	
日期				
2008/8/2	0	82.8		0.000
2008/8/3	0	82.92		0.000
2008/8/4	0	83		0.000
2008/8/5	0	83.02		0.000
2008/8/6	0	82.97		0.029
2008/8/7	0	83.01		0.000
2008/8/8	0	83		0.000
2008/8/9	0	83		0.000
2008/8/10	0	82.94		0.000
2008/8/11	0	82.96		0.058
2008/8/12	0	82.94		0.000
2008/8/13	0	82.95		0.000
2008/8/14	0	82.98		0.000

圖 5.54 D4 量水堰滲漏量(8/8)



透過以上最佳化反算之案例分析與極端假設條件之模擬結果，並藉由長期滲漏水量測數據以佐證說明，研判新山壩下游殼層坡面平台處(Sta.0+170m 橫斷面對應之高程為 EL.46m) 之異常滲出水，應與庫水藉由下游殼層之高透水通道出滲無關，而係源自下雨入滲，殘留於下游壩體內不均勻殼層材料內滲透性偏低材料上之棲止水，緩緩下滲(即使雨停仍可持續滲出)，進而流入殼層材料內滲透性偏高之透水通道後最後流出坡面平台。

以下繼而藉由模擬，嘗試解釋為何下游殼層水位觀測井會量測到高於水平濾層之水頭。

1. 先藉由合理之壩體各材料透水係數條件假設情況下，模擬浸潤面進入至下游殼層。新山壩現況模擬之壩材透水係數假設如表 5.4；材料分區如圖 5.55；飽和度分布與三個水位觀測井(#1、#2 與#3)實際水位所在之網格以黃色標誌如圖 5.56。

表 5.4 新山壩現況模擬之壩材透水係數(單位:cm/sec)

材料	基礎 foun- dation	心層 core	上游 殼層 shell	雜項 填方 fill	下游 殼層 dhell2	〈型 濾層 filter	水平 濾層 filter2
kh	1×10^{-6}	4.16×10^{-6}	3.8×10^{-5}	6×10^{-5}	2.5×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-4}
kv	1×10^{-6}	1.04×10^{-6}	9.5×10^{-6}	1.5×10^{-5}	2.5×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-4}

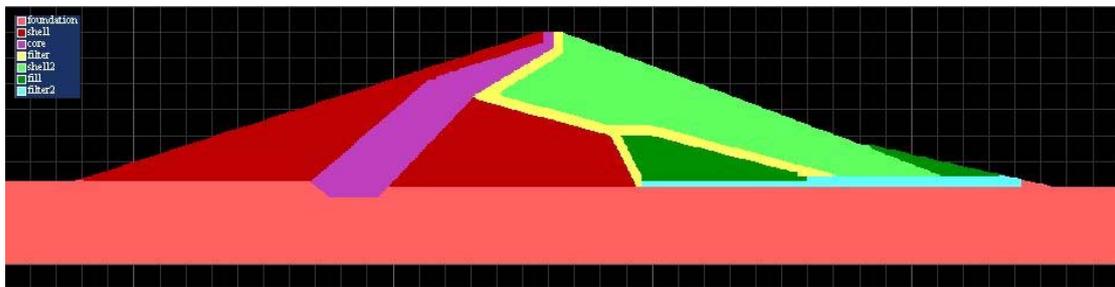


圖 5.55 新山壩現況模擬之材料分區圖

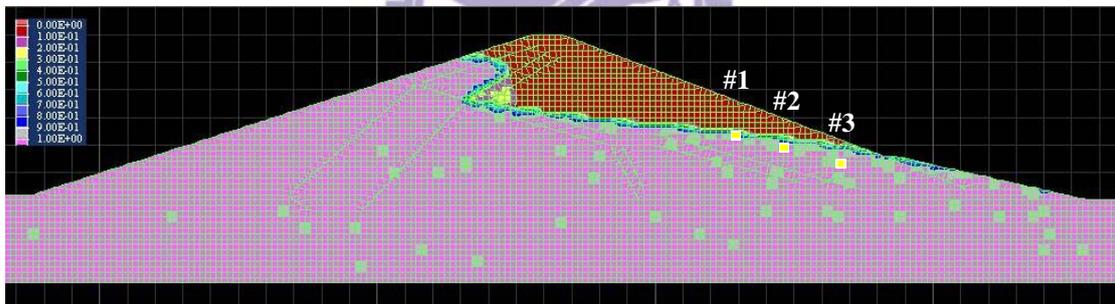


圖 5.56 新山壩現況模擬之飽和度分布圖

進一步假設壩體築高後之新濾層，其近下游出水段之水平透水係數 ($k_h=2 \times 10^{-4}$) 比原設計值 ($k_h=1 \times 10^{-4}$) 大一倍，此現象如同模擬溝渠排水能力，假設溝渠中某段有局部淤積，水流經過此處水位會往上抬升流過或因突然受阻使得流速變慢；相對地，若流經之處完全無阻礙物，

水流即能迅速往低處流動。因此分別從(1)#1 與#2 之後、(2)#2 與#3 之後、(3)緊鄰#3 之後與(4)遠離#3 之後，模擬透水性相對較佳之水平濾層末段其延伸範圍，假設此水平濾層末段之透水性較前段水平濾層高。圖 5.57 至圖 5.60 依序為對應(1)至(4)之模擬結果，其中左上為壩材分區圖(深綠色網格表示相對高透水之濾層段)和對應分段之透水係數(單位:cm/sec);右下為對應之飽和度圖與水位井水位對應之網格位置(以黃色塊表示)。藉此可看出透水性較好之水平濾層末段越長，則浸潤面就越低，不過下降幅度仍不明顯。

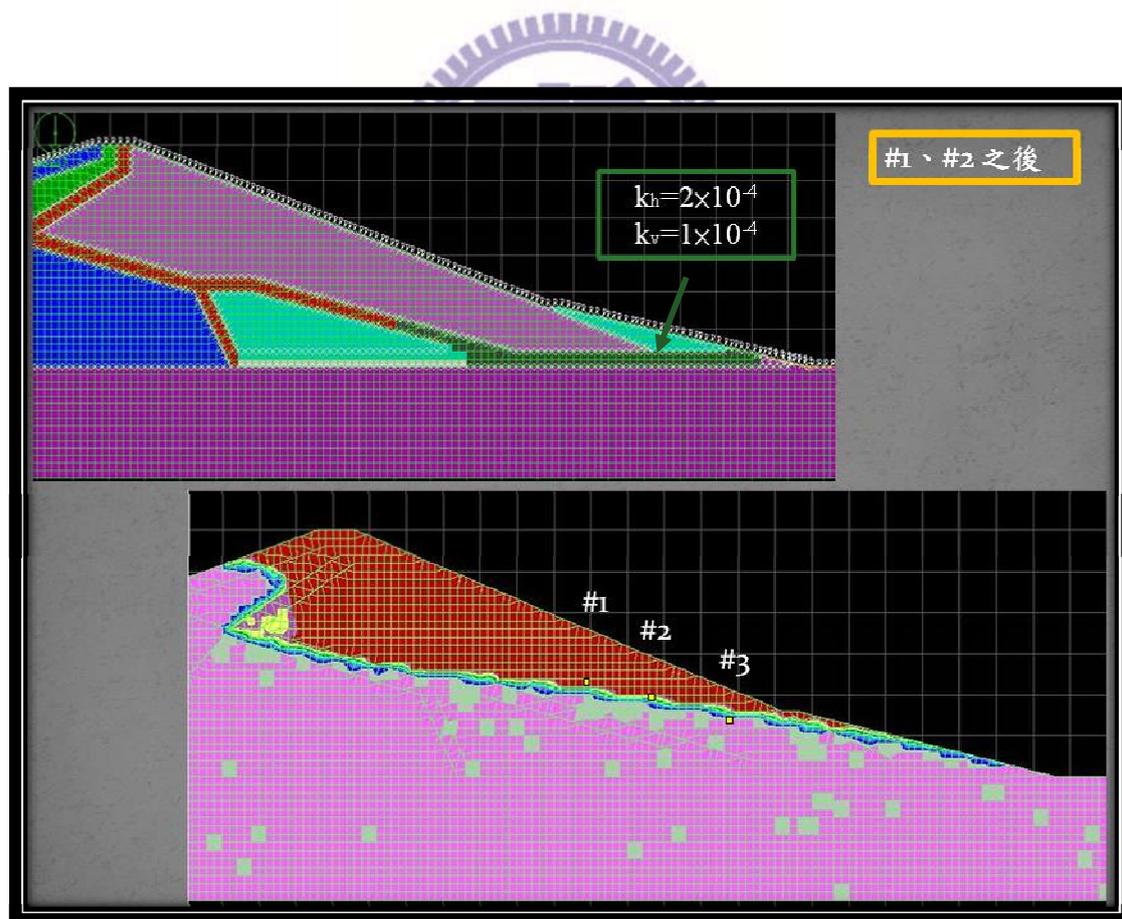


圖 5.57 兩段式濾層分區圖與飽和度分布圖(#1 與#2 之後)

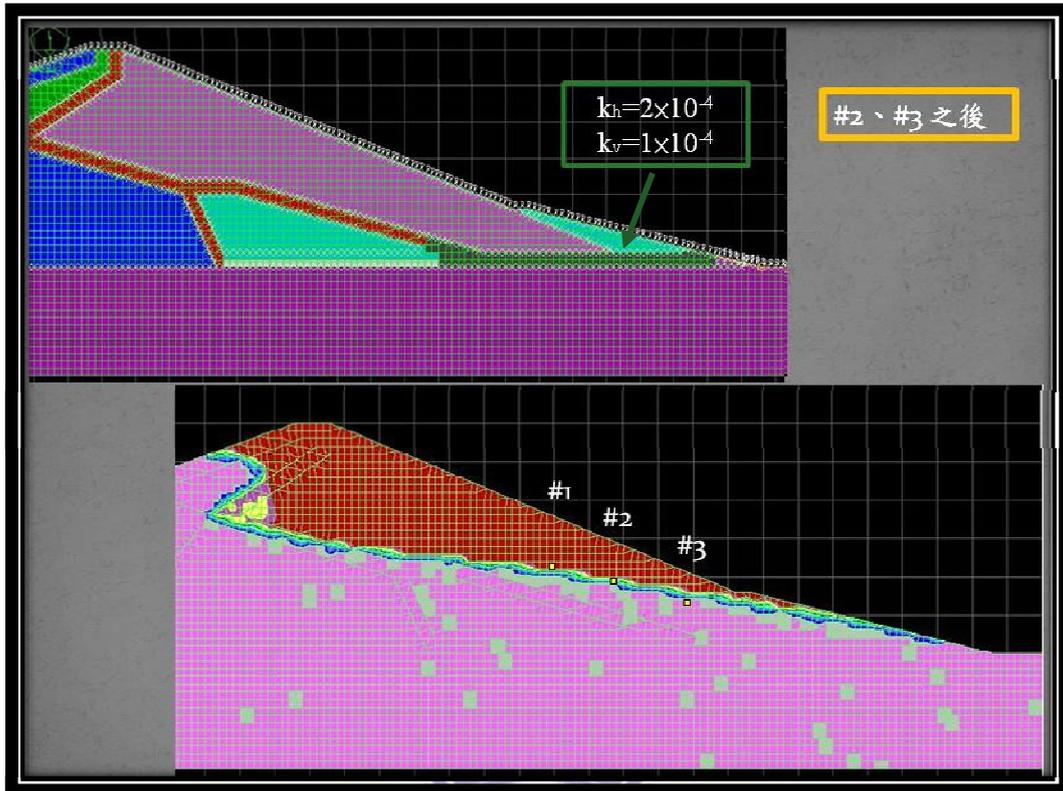


圖 5.58 兩段式濾層分區圖與飽和度分布圖(#2 與#3 之後)

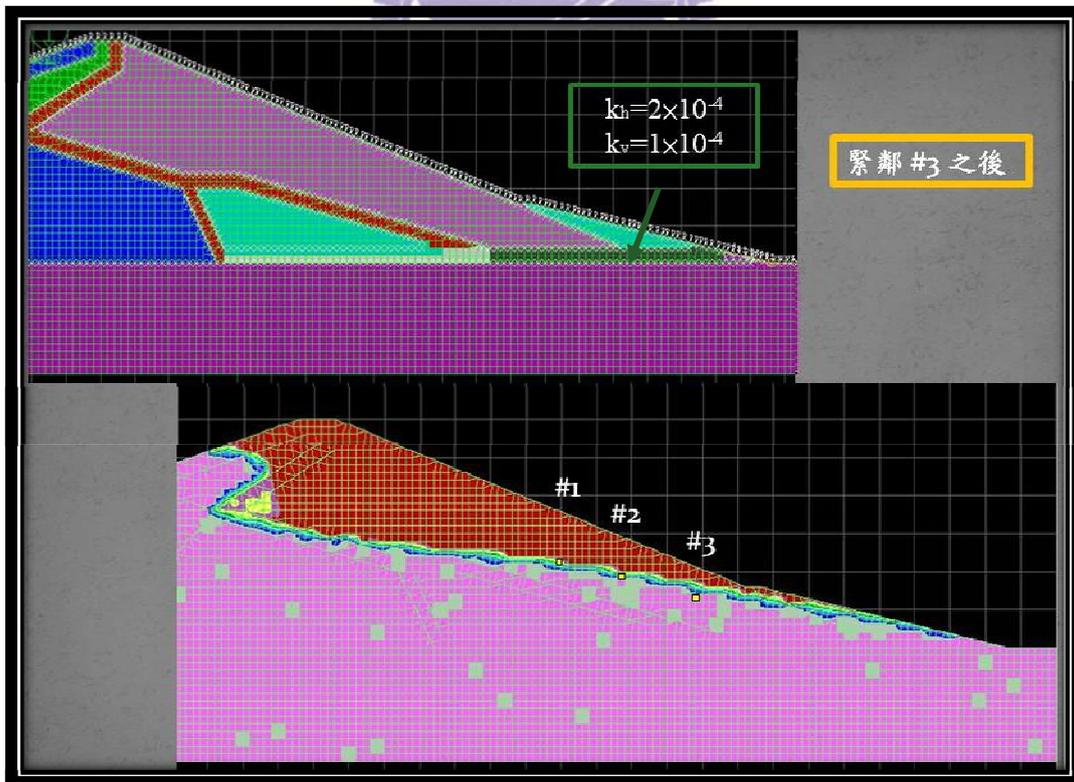


圖 5.59 兩段式濾層分區圖與飽和度分布圖(緊鄰#3 之後)

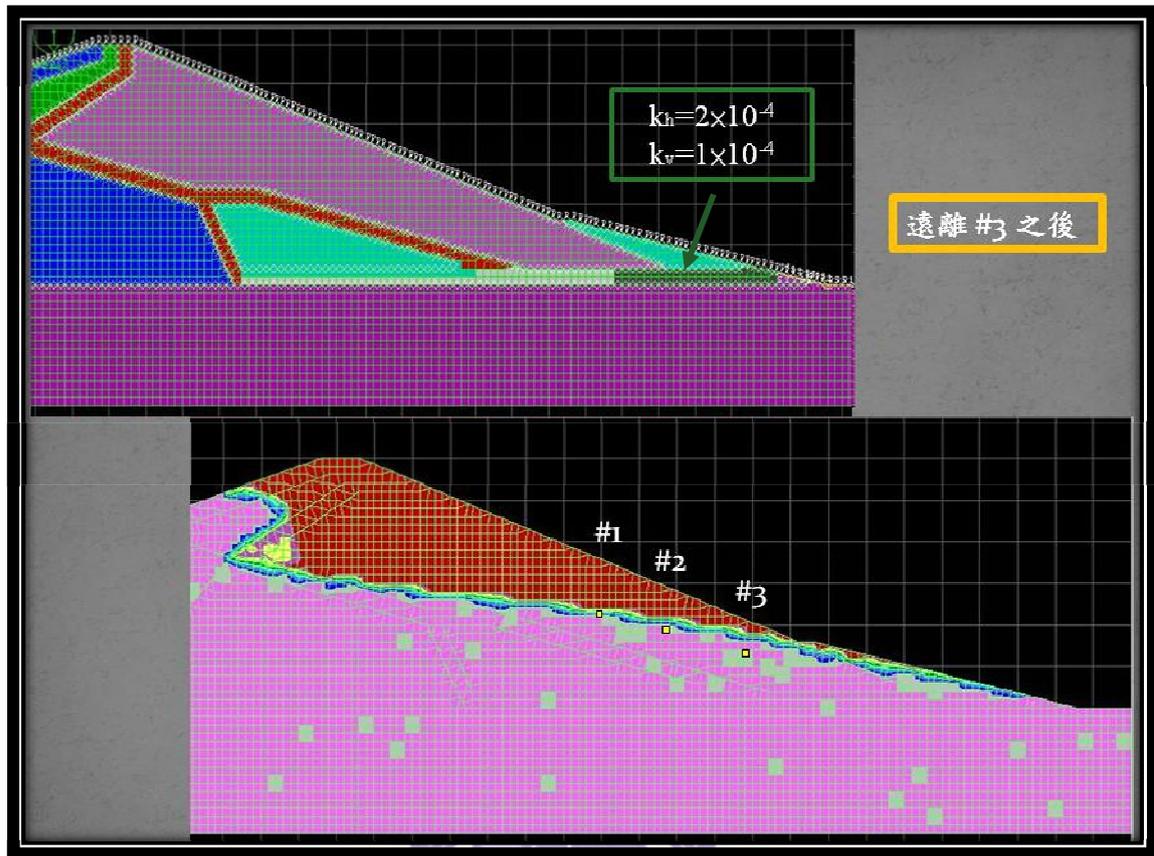


圖 5.60 兩段式濾層分區圖與飽和度分布圖(遠離#3 之後)

2. 為了使觀測水頭能與現況相符，令容許差距在一、兩米之內(即一網格大小)，且庫水並不從下游邊坡出露，因此接續以”遠離#3 之後”之濾層兩段式情形繼續分割濾層為三段式與四段式之模擬，並假設越往下游之濾層透水性越好。三段式與四段式結果分別表示如圖 5.61 與圖 5.62，其中左上為壩材分區圖和分段之透水係數(單位:cm/sec)；右下為對應之飽和度分布圖與水位井水位對應之網格位置(以黃色塊表示)。圖 5.62 之四段式濾層模擬結果與現況最為接近，其壩體總滲流量為 103.3 CMD。

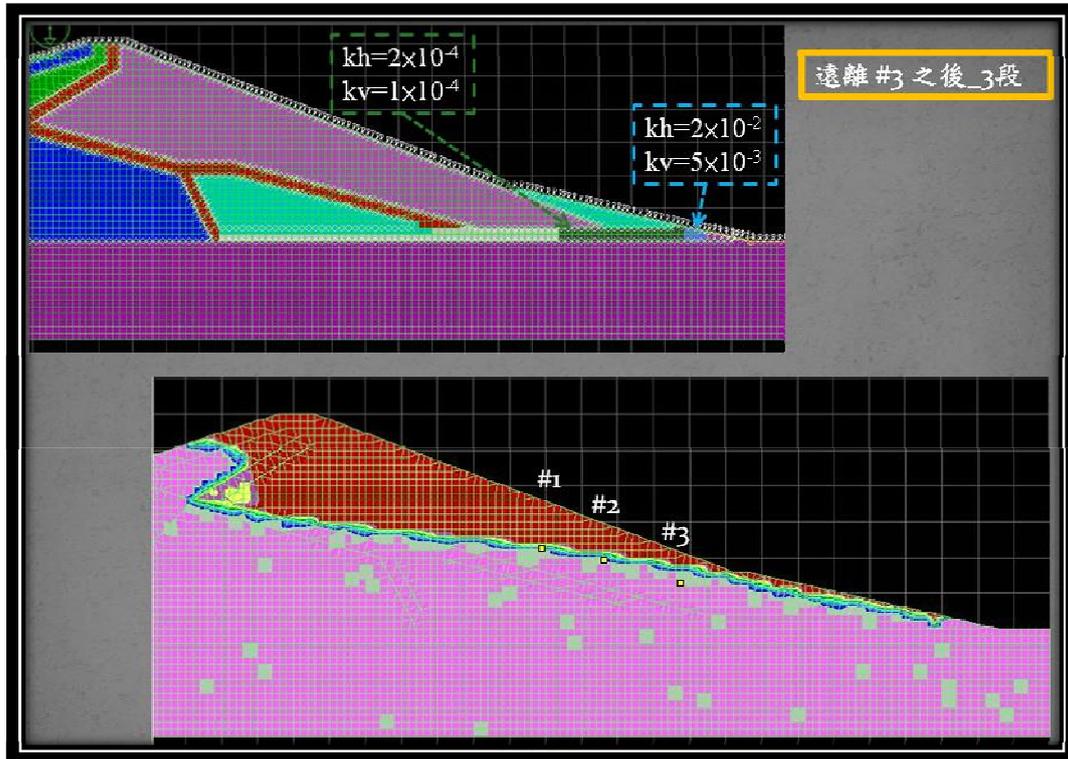


圖 5.61 三段式濾層分區圖與飽和度分布圖(遠離#3 之後)

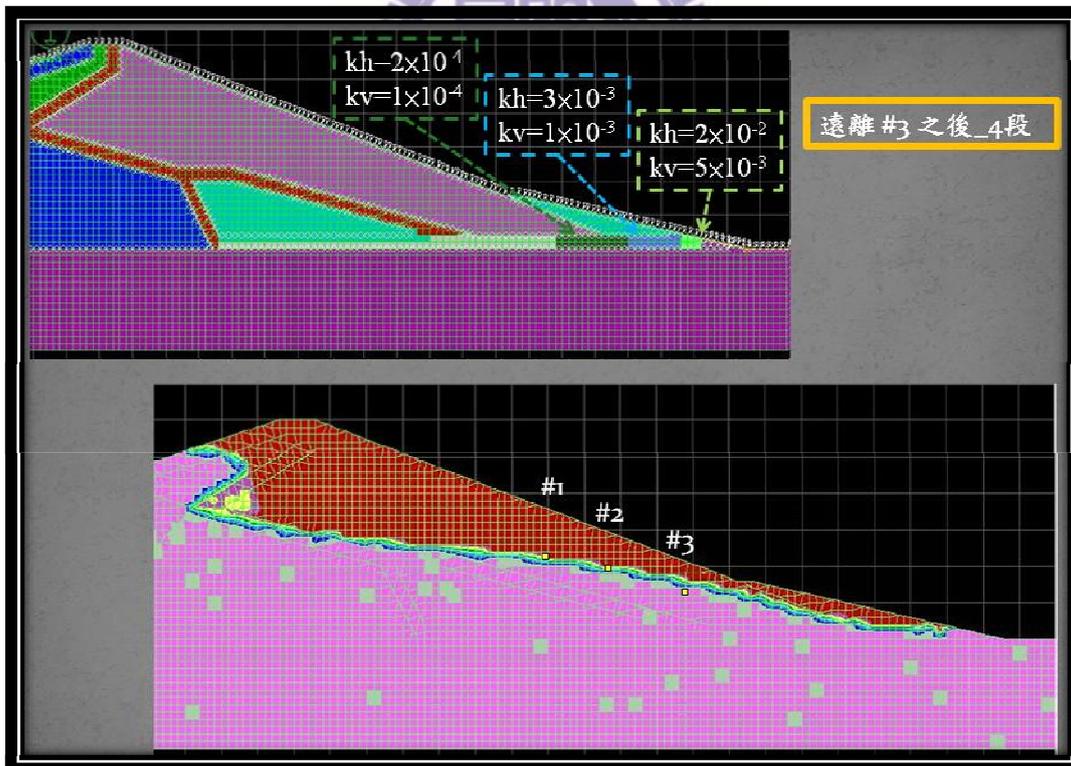
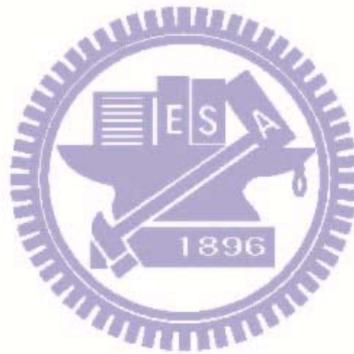


圖 5.62 四段式濾層分區圖與飽和度分布圖(遠離#3 之後)

3. 以此案例而言，欲由壩體外部透露之跡象診斷壩體內部可能存在之問題，恐非單純假設各分區材料為均質來模擬即可，宜先能一一探討可能發生之原因，並儘可能瞭解各現象問題後，再開始進行最佳化演算法之問題模式化，由此方能將實際問題儘可能地周全考量，以達到使用最佳化演算法進行最佳化問題反算分析之目的。

因此，下一節(即 5.5)將進一步針對新山壩近下游側之水平濾層段，以和弦搜尋最佳化法假設三種水平濾層透水性分布狀況，並以實際監測之水位觀測井之水頭與總壩體滲流量作為目標因子求解。



5.5 和弦搜尋最佳化法探討新山壩案例

由 5.4 節對新山壩案例現況之綜合探討結果可知，考量壩體局部水平濾層前、後段之透水性之差異，可解釋為何實際監測之浸潤面會高於水平濾層，並上升至壩體下游殼層內部且不從下游邊坡出露之情形。因此，5.5.1 節先針對近下游側之水平濾層之透水係數變化(以下簡稱變化段)擬定三種水平濾層透水性分布假設狀況，以最佳化法求解，水平濾層變化段如圖 5.63 之 filter3(網格 190 至 221)示，已知之透水係數同表 5.4 所示。5.5.2 節說明及討論此三種水平濾層透水性分布假設狀況分別以最佳化搜尋之結果。5.5.3 節為小結。

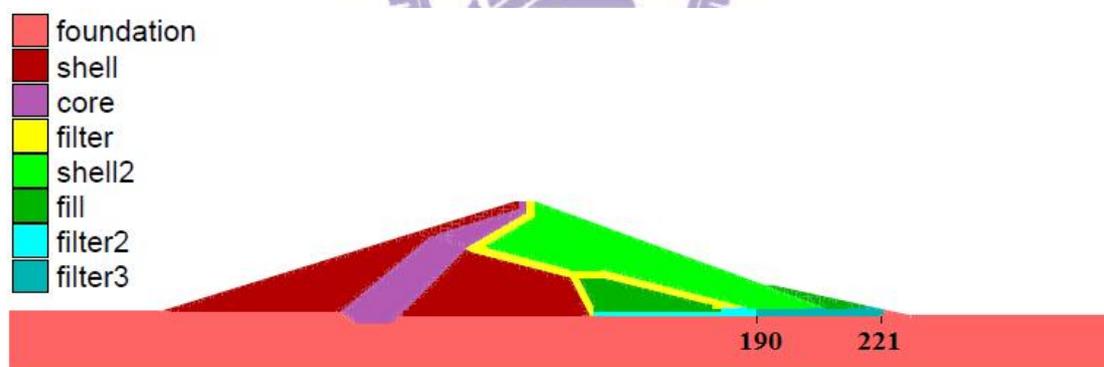


圖 5.63 水平濾層之透水係數變化段示意圖

5.5.1 三種水平濾層透水性分布假設狀況

第一種：兩段式透水性分布

假設於水平濾層變化段內，由上游往下游方向隨機產生兩段式之起始變化位置(網格)，再隨機設定為兩段不同透水係數，如圖 5.64。

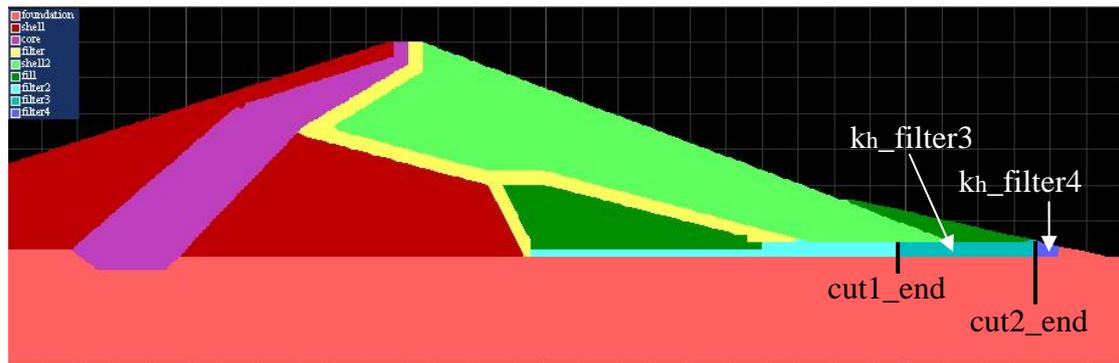


圖 5.64 水平濾層之透水係數兩段式示意圖

1. 待定變數(4 個)

- (1) 第一段起始位置： $cut1_end$ 。
- (2) 第二段起始位置： $cut2_end$ 。
- (3) 第一段水平濾層之水平透水係數： $k_h_filter3$ 。
- (4) 第二段水平濾層之水平透水係數： $k_h_filter4$ 。

2. 限制條件

- (1) 第一段起始位置(網格)： $190 \leq cut1_end < 219$ ， $cut1_end$ 為整數。

(2) 第二段起始位置(網格): $cut1_end < cut2_end < 221$, $cut2_end$ 為整數。

(3) 第一段水平濾層之水平透水係數 (cm/sec) :

$k_h_filter3 = (1 \sim 10) \times k_v_filter3$, $k_v_filter3 = 5 \times 10^{-4}$, $k_h_filter3$ 為 $k_v_filter3$ 整數倍。

(4) 第二段水平濾層之水平透水係數 (cm/sec) :

$k_h_filter4 = (1 \sim 10) \times k_v_filter4$, $k_v_filter4 = 5 \times 10^{-3}$, $k_h_filter4$ 為 $k_v_filter4$ 整數倍。

(5) 更新條件：各水位觀測井需有大於零之水頭。

(6) 其他(如:FLAC 滲流分析計算設定)。



3. 目標函數因子(4個)

目標函數：

$$f_{obj} = \alpha_Q \left(\frac{\bar{Q}_{obs} - \bar{Q}_{HM}}{\bar{Q}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th1} \left(\frac{\bar{th1}_{obs} - \bar{th1}_{HM}}{\bar{th1}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th2} \left(\frac{\bar{th2}_{obs} - \bar{th2}_{HM}}{\bar{th2}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th3} \left(\frac{\bar{th3}_{obs} - \bar{th3}_{HM}}{\bar{th3}_{obs}} \right)^2 \quad (5-1)$$

(1) 總壩體滲水量(CMD) : Q_{HM} , $\bar{Q}_{obs} = 120$ 。

(2) 三個水位觀測井之總水頭(m) : $th1_{HM}$ 、 $th2_{HM}$ 、 $th3_{HM}$,

$\bar{th1}_{obs} = 53$ 、 $\bar{th2}_{obs} = 48.5$ 、 $\bar{th3}_{obs} = 43$ 。

4. 參數設定

表 5.5 新山壩兩段式之參數設定

HMS	HMCR	PAR	bw	α_Q	α_{th1}	α_{th2}	α_{th3}
10	0.6	0.7	1	1	2	3	2

5. 終止條件

(1) 最大迭代次數 $N_{\maxsearch} = 200$ 。

(2) 先滿足 $140 \leq \bar{Q}_{HM} \leq 100$ 、 $51.5 \leq \bar{th1}_{HM} \leq 54.5$ 、

$47.5 \leq \bar{th2}_{HM} \leq 49.5$ 與 $41 \leq \bar{th3}_{HM} \leq 45$ 後，才判斷是否滿足

$$\varepsilon = |f_{obj_NewH} - \bar{f}_{obj_HM}| \leq 10^{-4}。$$

第二種：三段式透水性分布

假設於變化段內，由上游往下游方向隨機產生三段式之起始變化位置，再隨機分為三段不同透水係數之壩材，如圖 5.65。

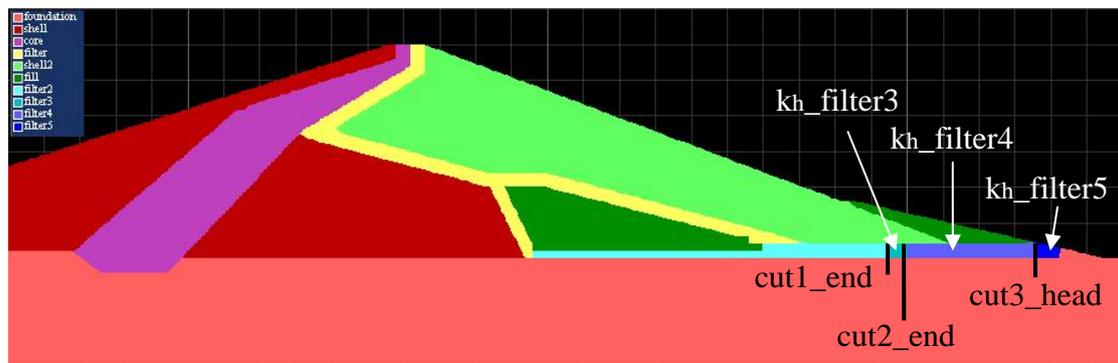


圖 5.65 水平濾層之透水係數三段式示意圖

1. 待定變數(6個)

- (1) 第一段起始位置： $cut1_end$ 。
- (2) 第二段起始位置： $cut2_end$ 。
- (3) 第三段起始位置： $cut3_head$ 。
- (4) 第一段水平濾層之水平透水係數： $k_h_filter3$ 。
- (5) 第二段水平濾層之水平透水係數： $k_h_filter4$ 。
- (6) 第三段水平濾層之水平透水係數： $k_h_filter5$ 。

2. 限制條件

- (1) 第一段起始位置(網格)： $190 \leq cut1_end < 217$ ， $cut1_end$ 為整數。
- (2) 第二段起始位置(網格)： $cut1_end < cut2_end < 219$ ， $cut2_end$ 為整數。
- (3) 第三段起始位置(網格)： $cut2_end < cut3_head < 220$ ， $cut3_head$ 為整數。
- (4) 第一段水平濾層之水平透水係數 (cm/sec)：
 $k_h_filter3 = (1 \sim 5) \times k_v_filter3$ ， $k_v_filter3 = 1 \times 10^{-4}$ ， $k_h_filter3$ 為 $k_v_filter3$ 整數倍。

(5) 第二段水平濾層之水平透水係數 (cm/sec) :

$k_h_filter4 = (1 \sim 5) \times k_v_filter4$, $k_v_filter4 = 1 \times 10^{-3}$, $k_h_filter4$ 為 $k_v_filter4$ 整數倍。

(6) 第三段水平濾層之水平透水係數 (cm/sec) :

$k_h_filter5 = (1 \sim 5) \times k_v_filter5$, $k_v_filter5 = 5 \times 10^{-3}$, $k_h_filter5$ 為 $k_v_filter5$ 整數倍。

(7) 更新條件：各水位觀測井需有大於零之水頭。

(8) 其他(如:FLAC 滲流分析計算設定)。

3. 目標函數因子(4個)

目標函數：

$$f_{obj} = \alpha_Q \left(\frac{\bar{Q}_{obs} - \bar{Q}_{HM}}{\bar{Q}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th1} \left(\frac{\bar{th1}_{obs} - \bar{th1}_{HM}}{\bar{th1}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th2} \left(\frac{\bar{th2}_{obs} - \bar{th2}_{HM}}{\bar{th2}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th3} \left(\frac{\bar{th3}_{obs} - \bar{th3}_{HM}}{\bar{th3}_{obs}} \right)^2 \quad (5-2)$$

(1) 總壩體滲水量(CMD)： Q_{HM} , $\bar{Q}_{obs} = 120$ 。

(2) 三個水位觀測井之總水頭(m)： $th1_{HM}$ 、 $th2_{HM}$ 、 $th3_{HM}$,

$\bar{th1}_{obs} = 53$ 、 $\bar{th2}_{obs} = 48.5$ 、 $\bar{th3}_{obs} = 43$ 。

4. 參數設定

表 5.6 新山壩三段式之參數設定

HMS	HMCR	PAR	bw	α_Q	α_{th1}	α_{th2}	α_{th3}
10	0.6	0.65	1	1	1	2	1

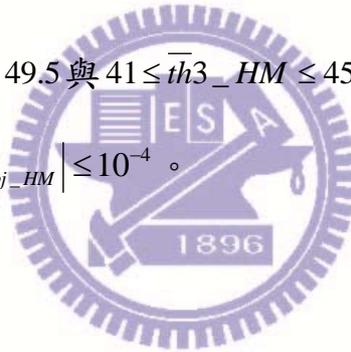
5. 終止條件

(1) 最大迭代次數 $N_{\text{maxsearch}} = 200$ 。

(2) 先滿足 $140 \leq \bar{Q}_{HM} \leq 100$ 、 $51.5 \leq \bar{th1}_{HM} \leq 54.5$ 、

$47.5 \leq \bar{th2}_{HM} \leq 49.5$ 與 $41 \leq \bar{th3}_{HM} \leq 45$ 後，才判斷是否滿足

$$\varepsilon = \left| f_{obj_NewH} - \bar{f}_{obj_HM} \right| \leq 10^{-4}。$$



第三種：漸進式透水性分布

假設於變化段內，由上游往下游方向隨機產生漸進式之起始變化位置，再隨機產生數段不同透水係數之壩材，如圖 5.66，其中已知

$$k_{v_end} = 5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec} \quad , \quad k_{h_end} = 2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec} \quad \circ$$

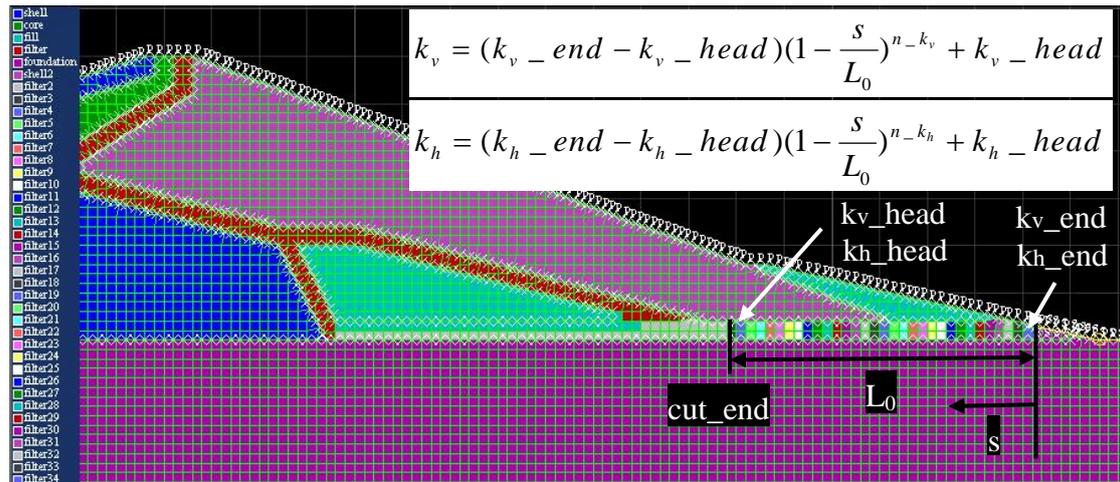


圖 5.66 水平濾層之透水係數漸進式示意圖

1. 待定變數(5 個)

- (1) 變化段上游起始位置： cut_end 。
- (2) 變化段上游起始垂直透水係數： k_{v_head} 。
- (3) 變化段上游起始水平透水係數： k_{h_head} 。
- (4) 變化段垂直透水係數之次數： n_{k_v} 。
- (5) 變化段水平透水係數之次數： n_{k_h} 。

2. 限制條件

- (1) 變化段上游起始位置(網格)： $190 \leq cut_end \leq 210$ ， cut_end 為整數。
- (2) 變化段上游起始垂直透水係數(cm/sec)： $k_v_head = (1 \sim 5) \times 10^{-4}$ ， k_v_head 以科學記號表示至整數。
- (3) 變化段上游起始水平透水係數(cm/sec)：
 $k_h_head = (1 \sim 4) \times k_v_head$ ， k_h_head 為 k_v_head 整數倍。
- (4) 變化段垂直透水係數之次數： $n_k_v = 1 \sim 5$ ， n_k_v 為整數。
- (5) 變化段水平透水係數之次數： $n_k_h = 1 \sim 5$ ， n_k_h 為整數。
- (6) 更新條件：各水位觀測井需有大於零之水頭。
- (7) 其他(如:FLAC 滲流分析計算設定)。

3. 目標函數因子(4個)

目標函數：

$$f_{obj} = \alpha_Q \left(\frac{\bar{Q}_{obs} - \bar{Q}_{HM}}{\bar{Q}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th1} \left(\frac{\bar{th1}_{obs} - \bar{th1}_{HM}}{\bar{th1}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th2} \left(\frac{\bar{th2}_{obs} - \bar{th2}_{HM}}{\bar{th2}_{obs}} \right)^2 + \alpha_{th3} \left(\frac{\bar{th3}_{obs} - \bar{th3}_{HM}}{\bar{th3}_{obs}} \right)^2 \quad (5-3)$$

- (1) 總壩體滲水量(CMD)： Q_{HM} ， $\bar{Q}_{obs} = 120$ 。

(2) 三個水位觀測井之總水頭(m)： $th1_HM$ 、 $th2_HM$ 、 $th3_HM$ ，

$$\bar{th1_obs} = 53、\bar{th2_obs} = 48.5、\bar{th3_obs} = 43。$$

4. 參數設定

表 5.7 新山壩漸進式之參數設定

HMS	HMCR	PAR	bw	α_Q	α_{th1}	α_{th2}	α_{th3}
10	0.6	0.7	1	0.5	2	3	2

5. 終止條件

(1) 最大迭代次數 $N_maxsearch = 200$ 。

(2) 先滿足 $140 \leq \bar{Q}_HM \leq 100$ 、 $51.5 \leq \bar{th1}_HM \leq 54.5$ 、

$47.5 \leq \bar{th2}_HM \leq 49.5$ 與 $41 \leq \bar{th3}_HM \leq 45$ 後，才判斷是否滿足

$$\varepsilon = \left| f_{obj_NewH} - \bar{f}_{obj_HM} \right| \leq 10^{-4}。$$

5.5.2 三種透水性分布型態之最佳化求解結果

第一種：兩段式透水性分布

圖 5.67 為迭代次數(N)與和弦記憶(HM)之平均目標函數值之關係圖，共搜尋了 200 次，最後 HM 函數平均值約收斂至 0.04。圖 5.68 為迭代次數與 HM 中的滲流量因子平均值之關係圖，並於搜尋第 124 次之後的 HM 平均值，均在最低容許目標值 100 CMD 上下，不過難以上升至目標值 120 CMD；另外三個 HM 中的總水頭因子(th1、th2、th3)與迭代次數之關係圖，如圖 5.69 至圖 5.71，其中 th1 平均值收斂至 52.1m，與目標值 53 m 差 2m(一網格大小)內，而 th2 平均值收斂至 49.6m，與目標值 48.5 m 差 2m(一網格大小)內， th3 平均值則只能收斂至 46.3m，與目標值 43 m 差仍超出 2m(一網格大小)。由圖 5.69 至圖 5.71 也可看出，三個水位井水頭隨迭代次數變化相當一致。

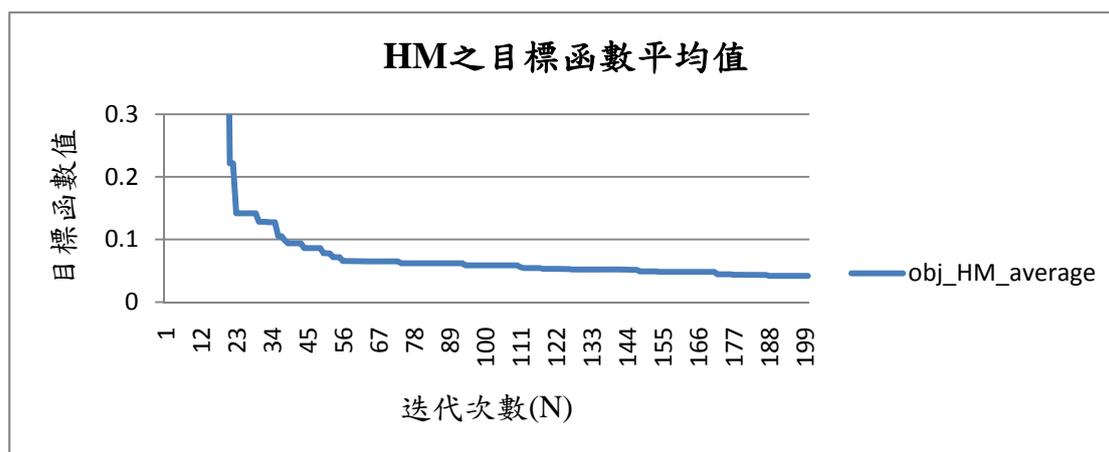


圖 5.67 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖

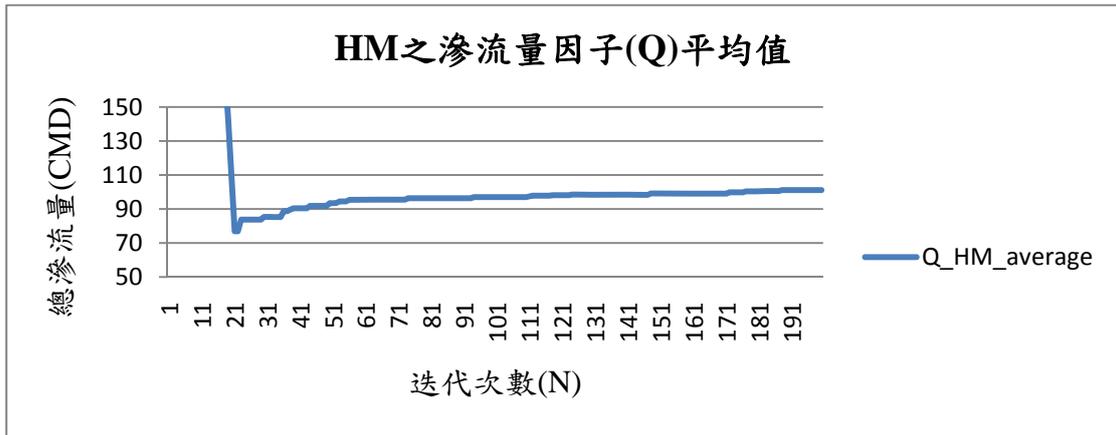


圖 5.68 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 滲流量因子之關係圖

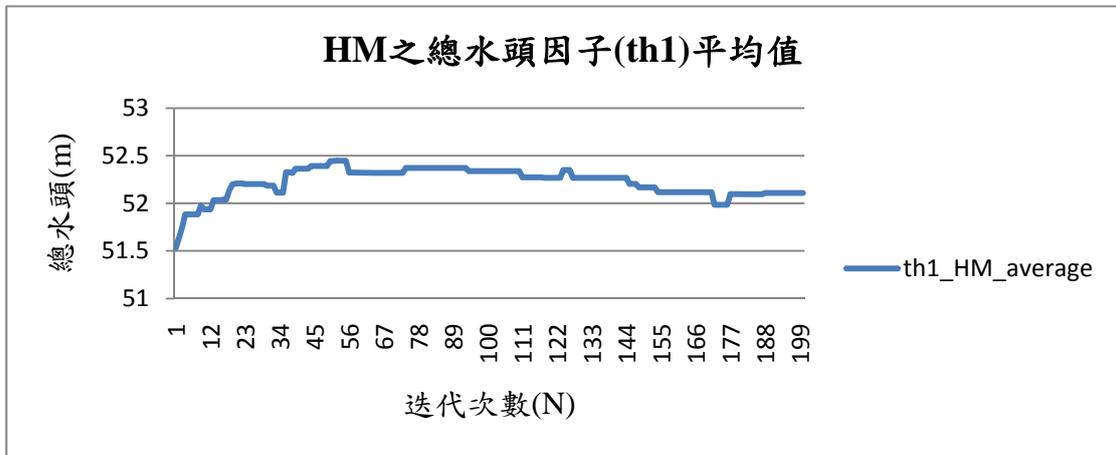


圖 5.69 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th1)之關係圖

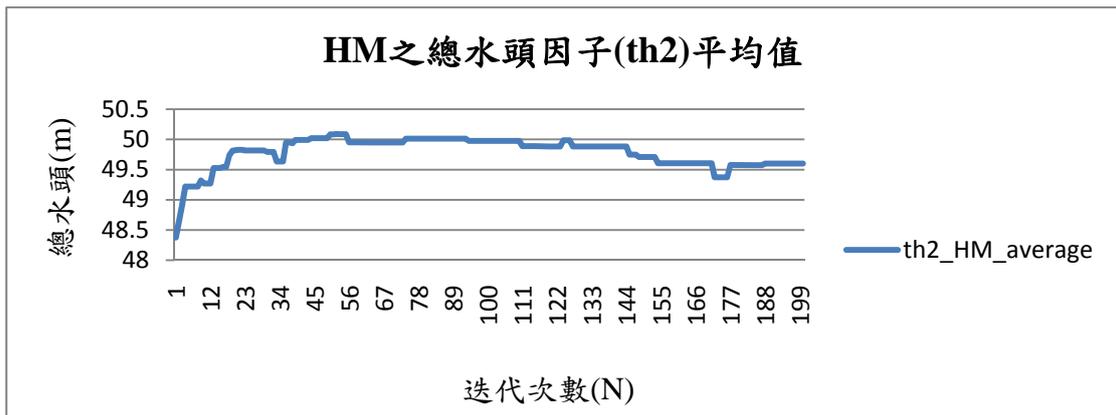


圖 5.70 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th2)之關係圖

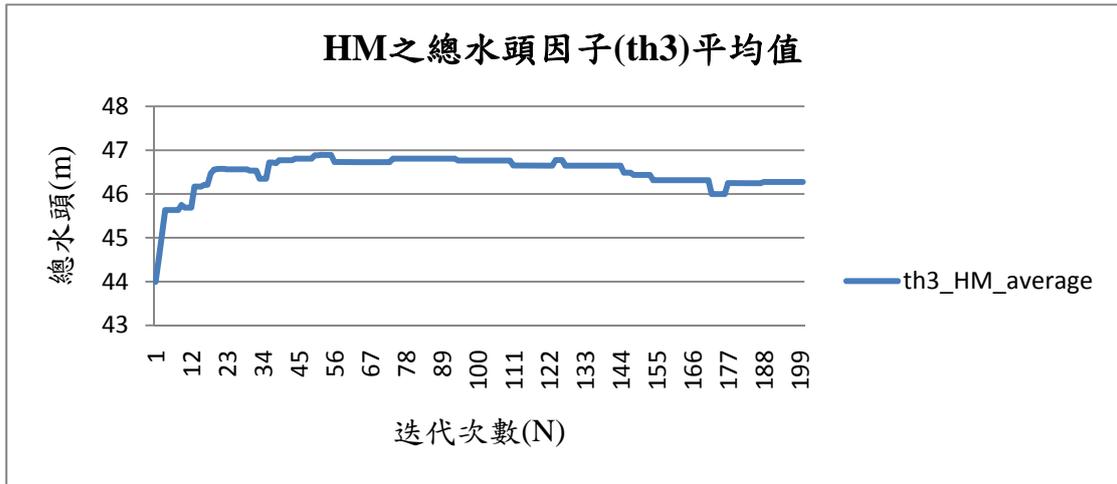


圖 5.71 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th3)之關係圖

此外，將 4 個待定變數之 HM 平均值與迭代次數關係圖分別表示為圖 5.72 至圖 5.75。其中 cut1_end 約收斂至 209，cut2_end 約收斂至 216，kh_filter3 約收斂至 2×10^{-3} cm/sec，kh_filter4 約收斂至 1.5×10^{-2} cm/sec。

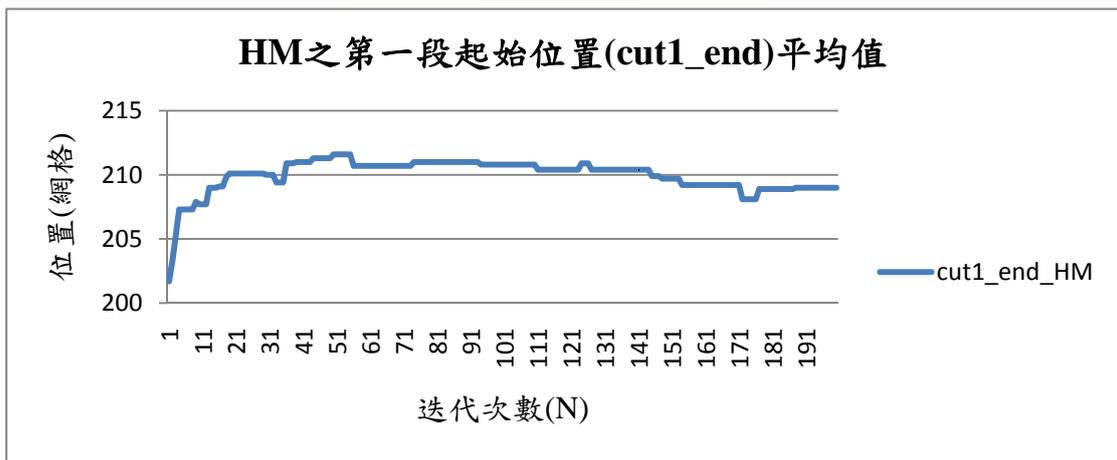


圖 5.72 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 第一段起始位置(cut1_end)之關係圖

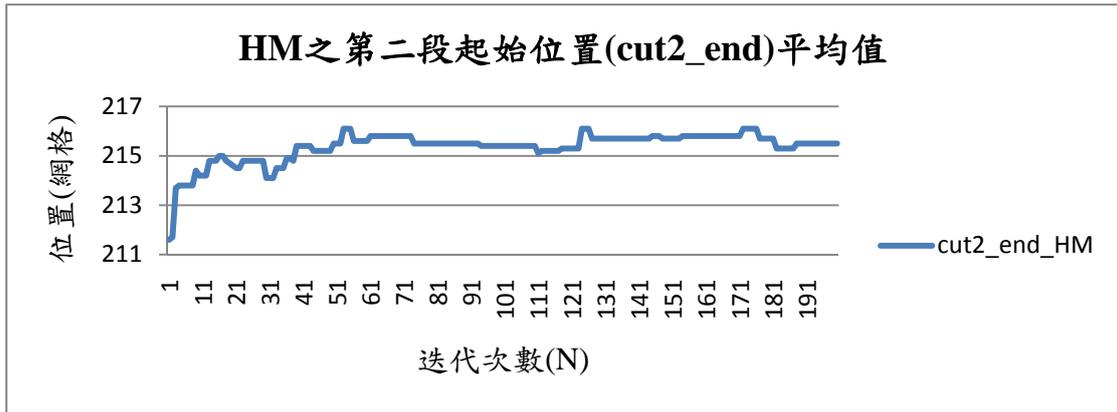


圖 5.73 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 第二段起始位置(cut2_end)之關係圖

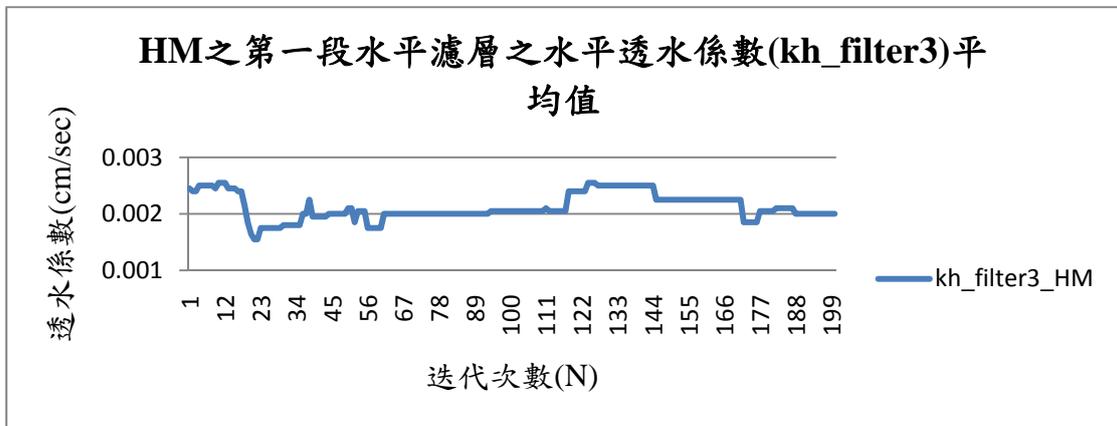


圖 5.74 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 第一段水平濾層(kh_filter3)之關係圖

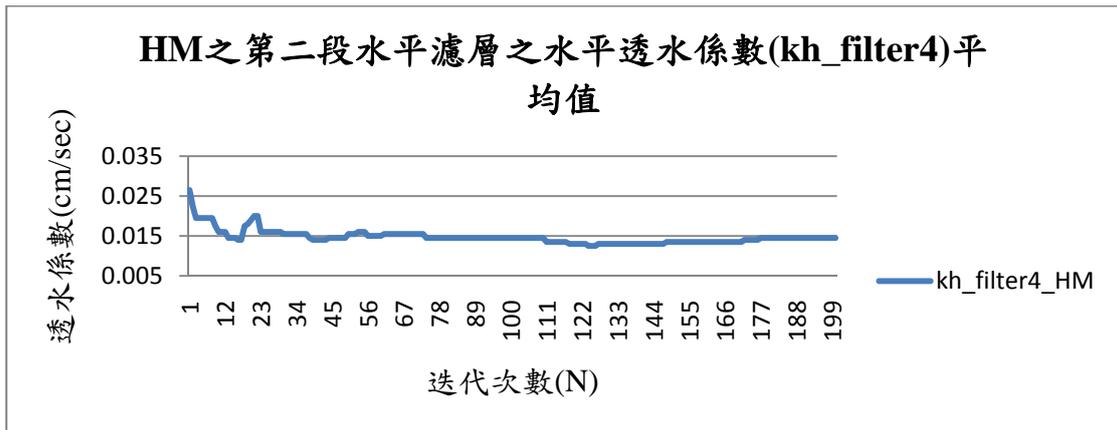


圖 5.75 新山壩兩段式之迭代次數與 HM 第二段水平濾層(kh_filter4)之關係圖

迭代 200 次中最佳目標函數值計算結果為第 172 次 (N_search=172)，目標函數最低值(f_{\min_obj})為 0.0260876。對應目標因子總壩體滲流量(HM_Q)為 102.2 CMD，與容許最低目標值 100 CMD 相近；而總水頭之目標因子 th1 最佳值為 51.01m，與目標值 53m 差 2m 內；水頭之目標因子 th2 最佳值為 47.67m，與目標值 48.5m 差 2m 內；水頭之目標因子 th3 最佳值為 43.65m，與目標值 43m 差 2m 內，並將結果標示於圖 5.76 之飽和度圖上。此外，將搜尋之最佳待變數值標示於圖 5.77 壩材分布圖中。

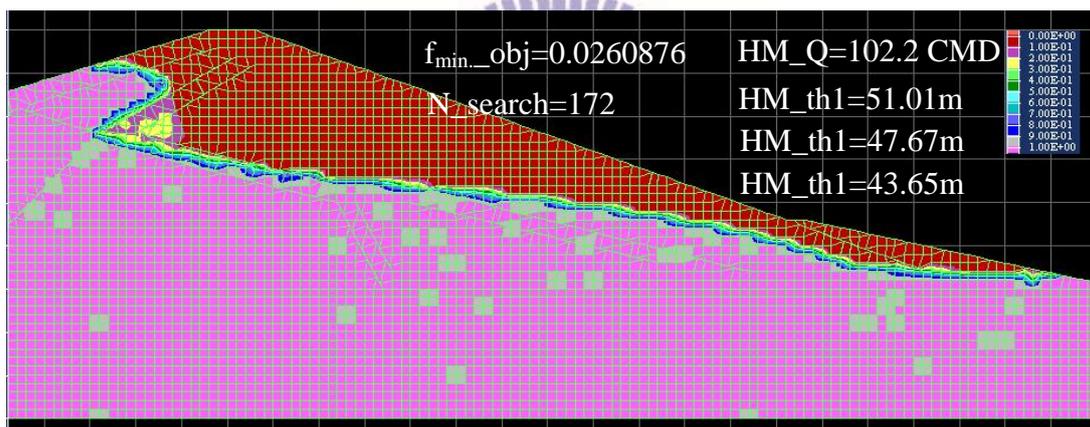


圖 5.76 新山壩兩段式之 HM 最佳搜尋結果之飽和度圖

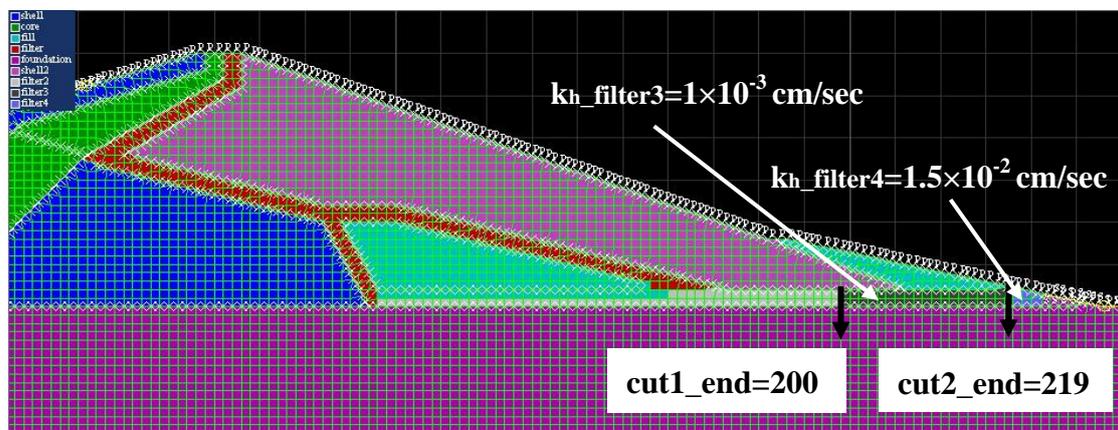


圖 5.77 新山壩兩段式之 HM 最佳搜尋結果之壩材變數圖

第二種：三段式透水性分布

圖 5.78 為迭代次數(N)與和弦記憶(HM)之平均目標函數值之關係圖，共搜尋了 200 次，最後 HM 函數平均值約收斂至 0.027。圖 5.79 為迭代次數與 HM 中的滲流量因子平均值之關係圖，並於搜尋第 114 次之後的 HM 平均值，均在最低容許目標值 100 CMD 以上，不過難以上升至目標值 120 CMD；另外三個 HM 中的總水頭因子(th1、th2、th3)與迭代次數之關係圖，如圖 5.80 至圖 5.82，其中 th1 平均值收斂至 51.6m，與目標值 53 m 差 2m(一網格大小)內，而 th2 平均值收斂至 48.6m，與目標值 48.5 m 差 2m 內，另外 th3 平均值收斂至 44.5m，與目標值 43 m 差 2m 內。由圖 5.80 至圖 5.82 也可看出，三個水位井水頭隨迭代次數變化相當一致。

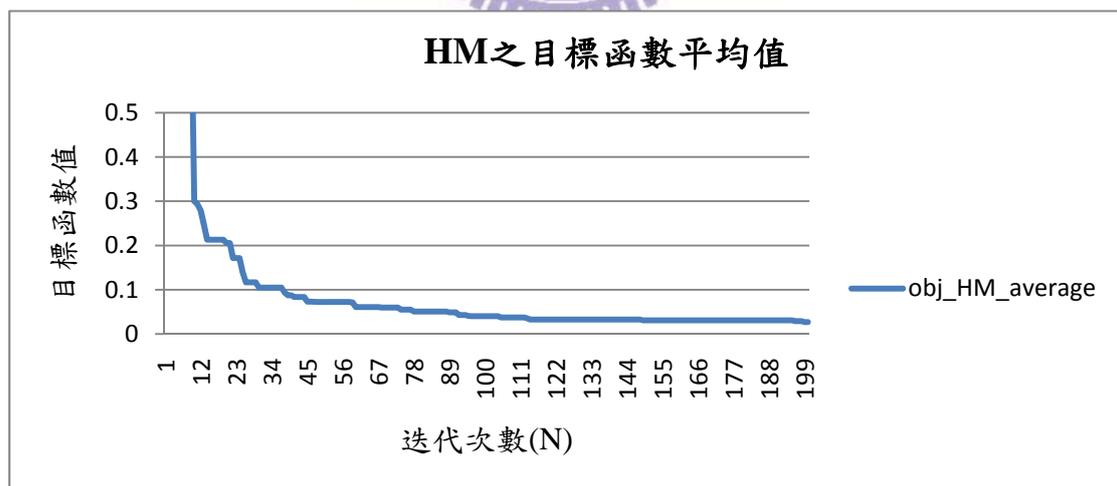


圖 5.78 新山壩三段式之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖

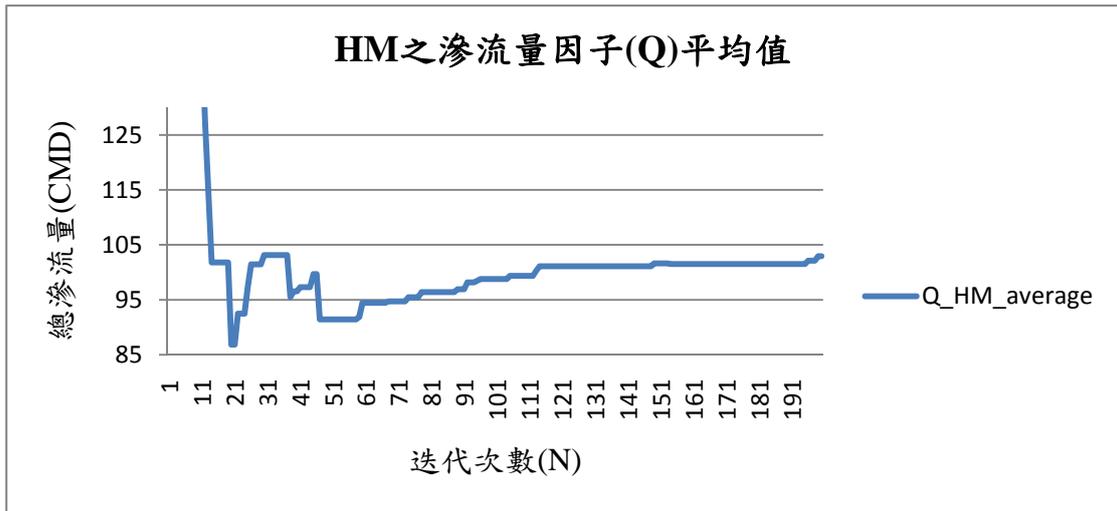


圖 5.79 新山壩三段式之迭代次數與 HM 滲流量因子之關係圖

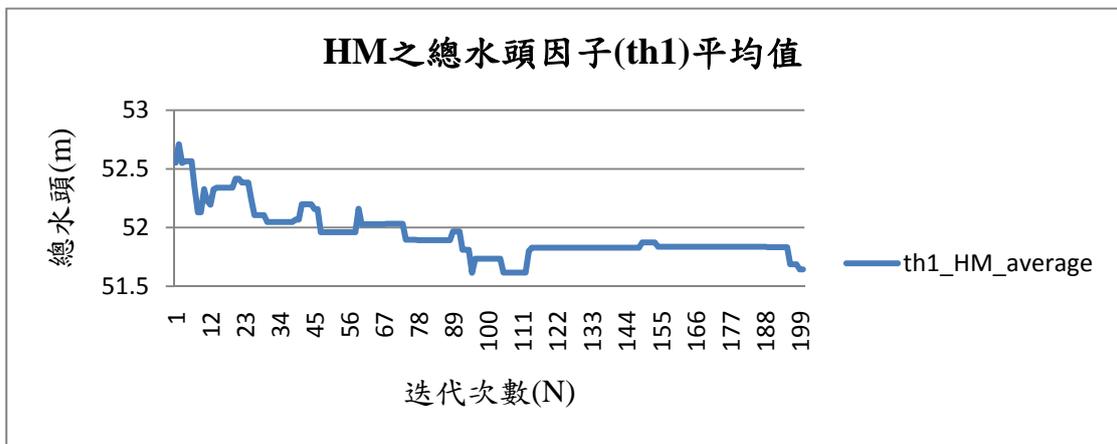


圖 5.80 新山壩三段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th1)之關係圖

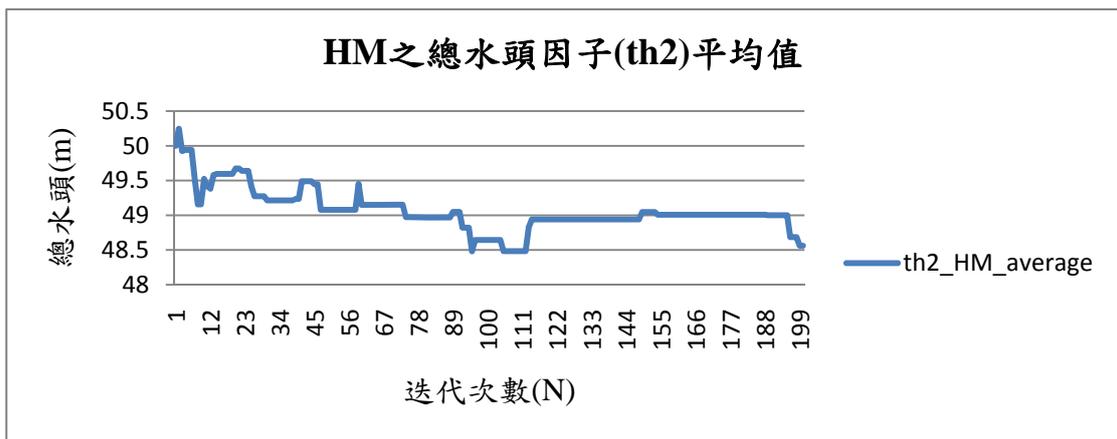


圖 5.81 新山壩三段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th2)之關係圖

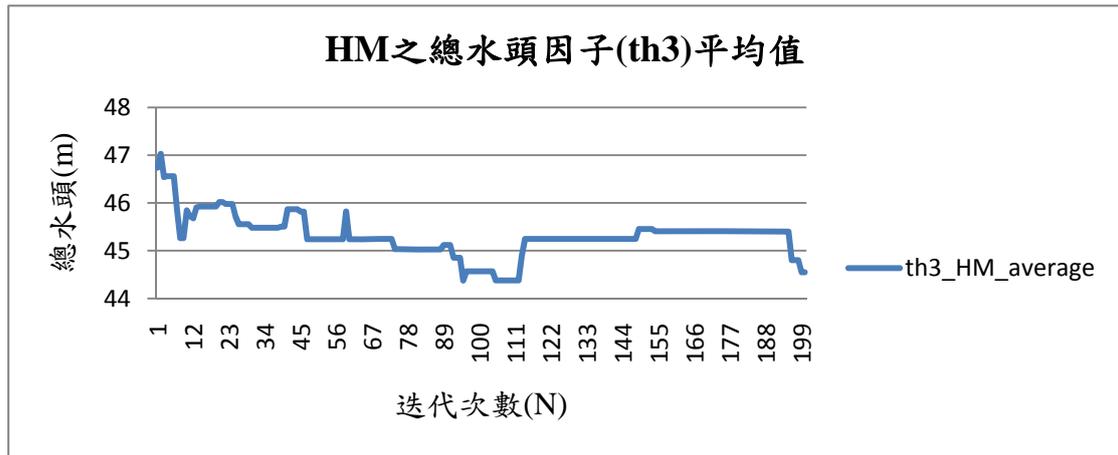


圖 5.82 新山壩三段式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th3)之關係圖

此外，將 6 個待定變數之 HM 平均值與迭代次數關係圖分別表示為圖 5.83 至圖 5.88。其中 cut1_end 約收斂至 204，cut2_end 約收斂至 214，cut3_head 約收斂至 217，kh_filter3 約收斂至 3.4×10^{-4} cm/sec，kh_filter4 約收斂至 3.1×10^{-3} cm/sec，kh_filter5 約收斂至 1.6×10^{-2} cm/sec。

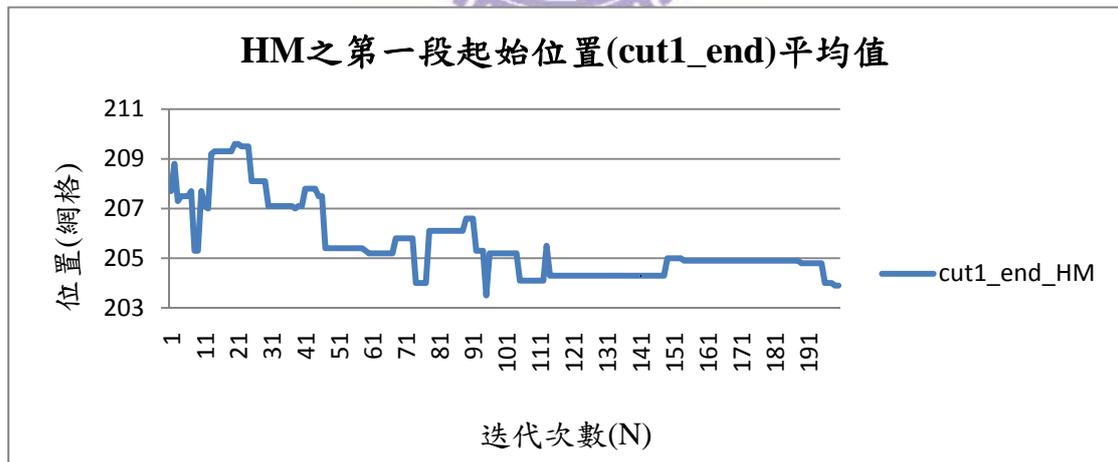


圖 5.83 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第一段起始位置(cut1_end)之關係圖

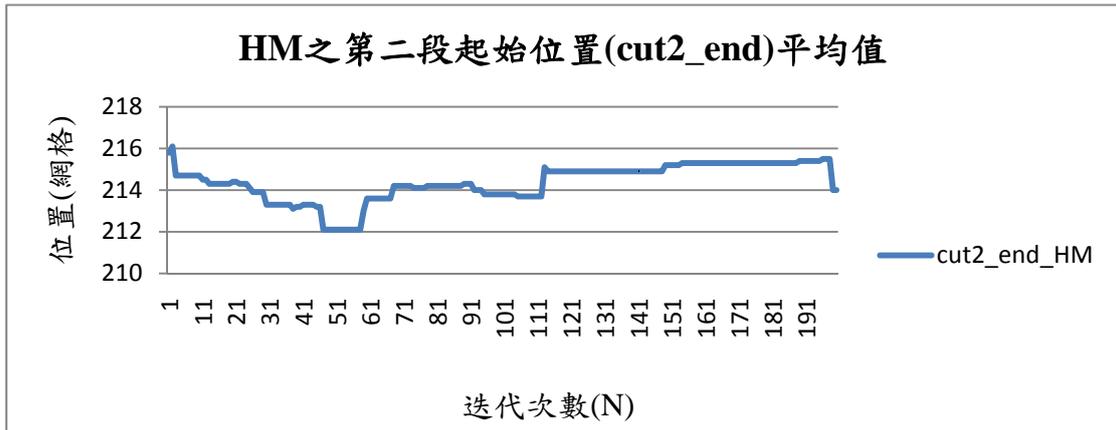


圖 5.84 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第二段起始位置(cut2_end)之關係圖

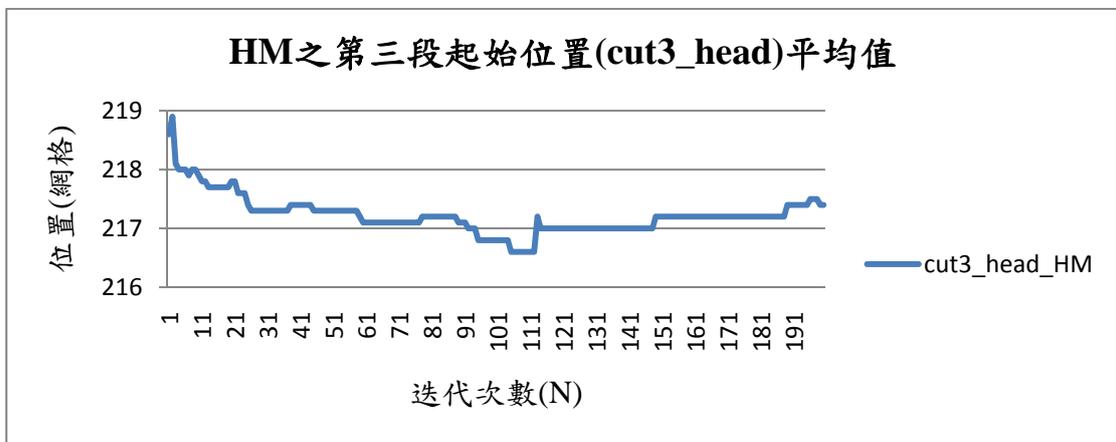


圖 5.85 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第三段起始位置(cut3_head)之關係圖

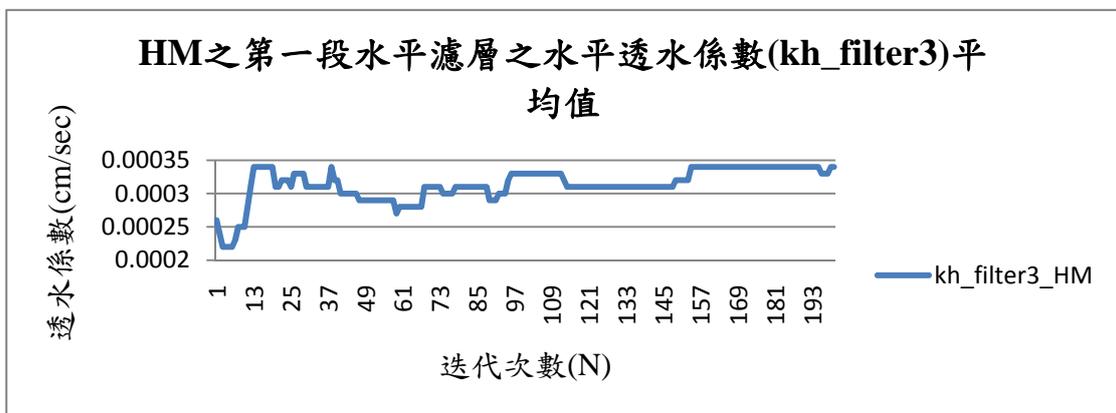


圖 5.86 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第一段水平濾層(kh_filter3)之關係圖

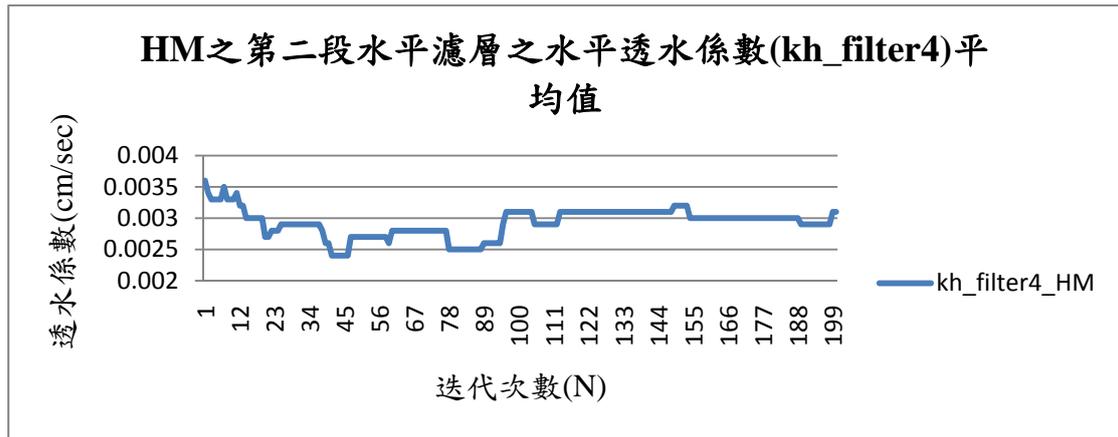


圖 5.87 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第二段水平濾層(kh_filter4)之關係圖

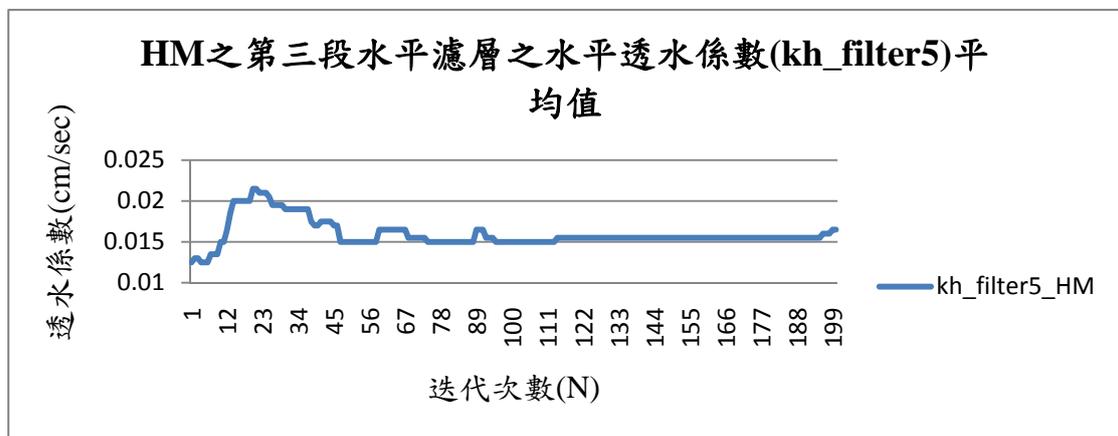


圖 5.88 新山壩三段式之迭代次數與 HM 第三段水平濾層(kh_filter5)之關係圖

迭代 200 次中最佳目標函數值計算結果為第 199 次 (N_search=199)，目標函數值(f_{\min_obj})為 0.0179588。目標因子總壩體滲流量(HM_Q)為 105.5 CMD，與容許最低目標值 100 CMD 相近；而總水頭之目標因子 th1 最佳值收斂至 51 m(目標值 53 m)，水頭之目標因子 th2 最佳值收斂至 47.1m(目標值 48.5 m)，水頭之目標因子 th3 最佳值收斂至 42.36m，(目標值 43 m)，三者之收斂值均已與目標值

僅相差一網格大小(2m)以內。結果標示於圖 5.89 之飽和度圖上。此

外，搜尋得之最佳待定變數值標示於圖 5.90 壩材分布圖中。

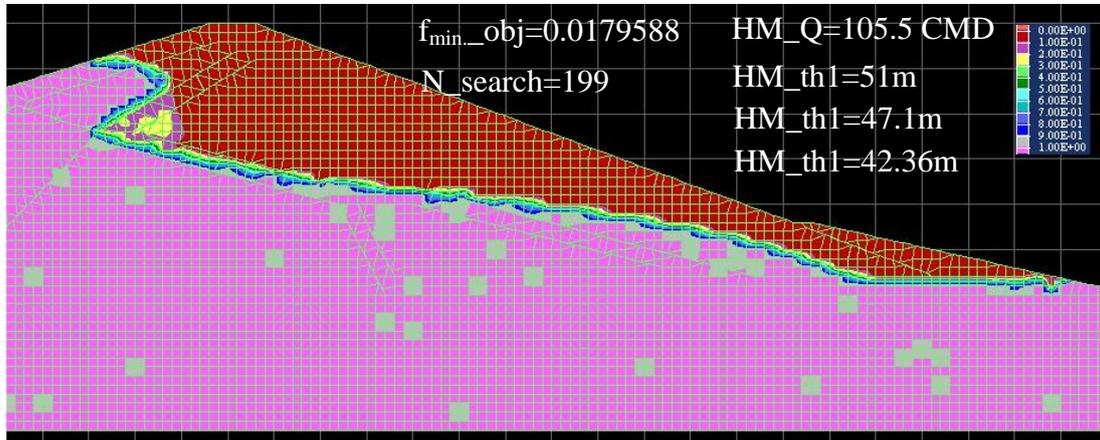


圖 5.89 新山壩三段式之 HM 最佳搜尋結果之飽和度圖

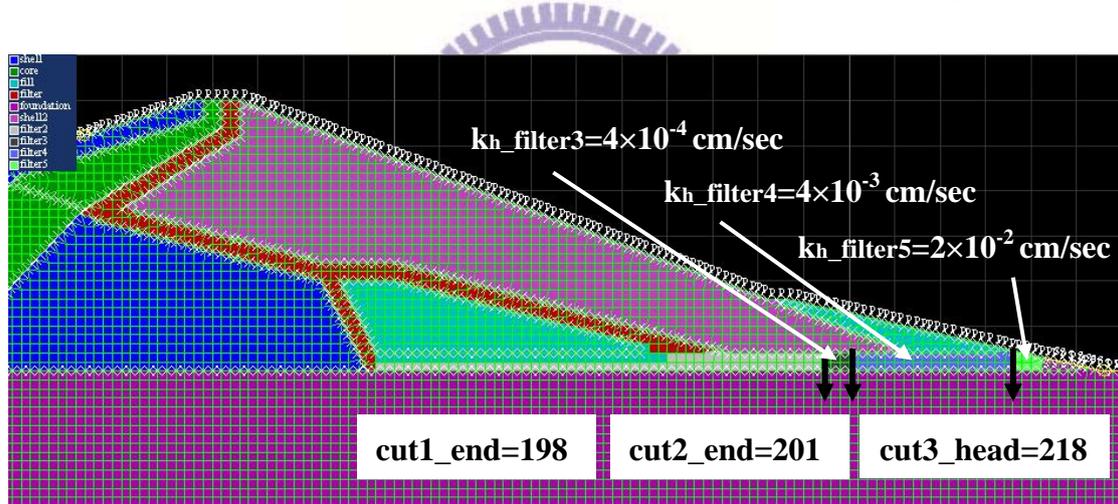


圖 5.90 新山壩三段式之 HM 最佳搜尋結果之壩材變數圖

第三種：漸進式透水性分布

圖 5.91 為迭代次數(N)與和弦記憶(HM)之平均目標函數值之關係圖，共搜尋了 200 次，最後 HM 函數平均值約收斂至 0.016。圖 5.92 為迭代次數與 HM 中的滲流量因子平均值之關係圖，並於搜尋第 183 次之後的 HM 平均值，均與目標值 120 CMD 相差不到 5 CMD；另外三個 HM 中的總水頭因子(th1、th2、th3)與迭代次數之關係圖，如圖 5.93 至圖 5.95，其中 th1 平均值收斂至 51.35m(目標值 53 m)，th2 平均值收斂至 48.2m(目標值 48.5 m)，th3 平均值收斂至 44.4m(目標值 43 m)，三者之收斂值均已與目標值僅相差一網格大小(2m)以內。由圖 5.93 至圖 5.95 也可看出，三個水位井水頭隨迭代次數變化相當一致。

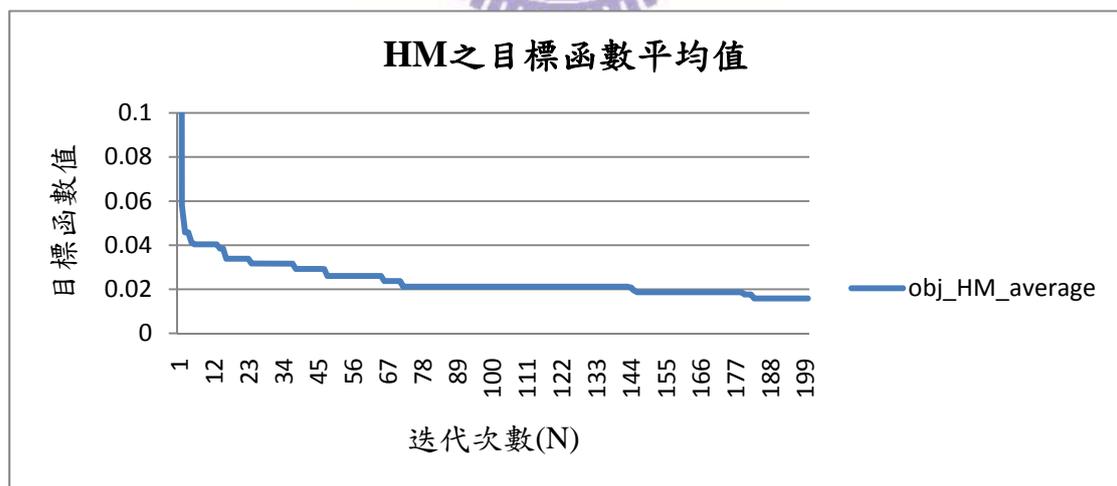


圖 5.91 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 目標函數之關係圖

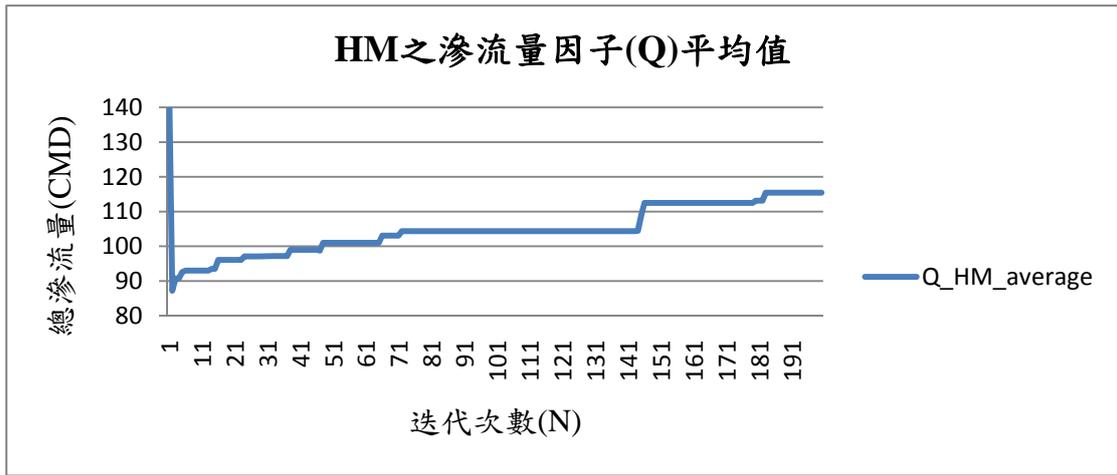


圖 5.92 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 滲流量因子之關係圖

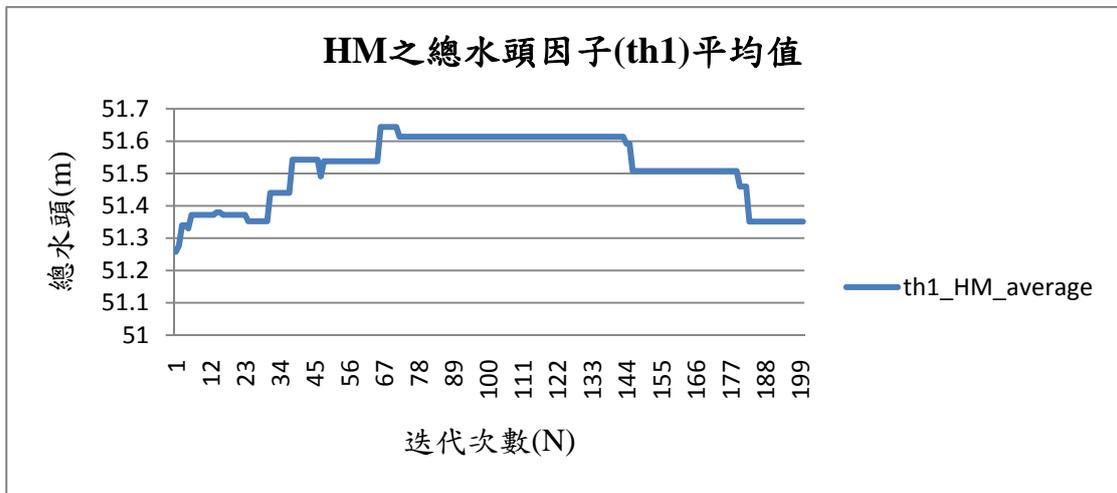


圖 5.93 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th1)之關係圖

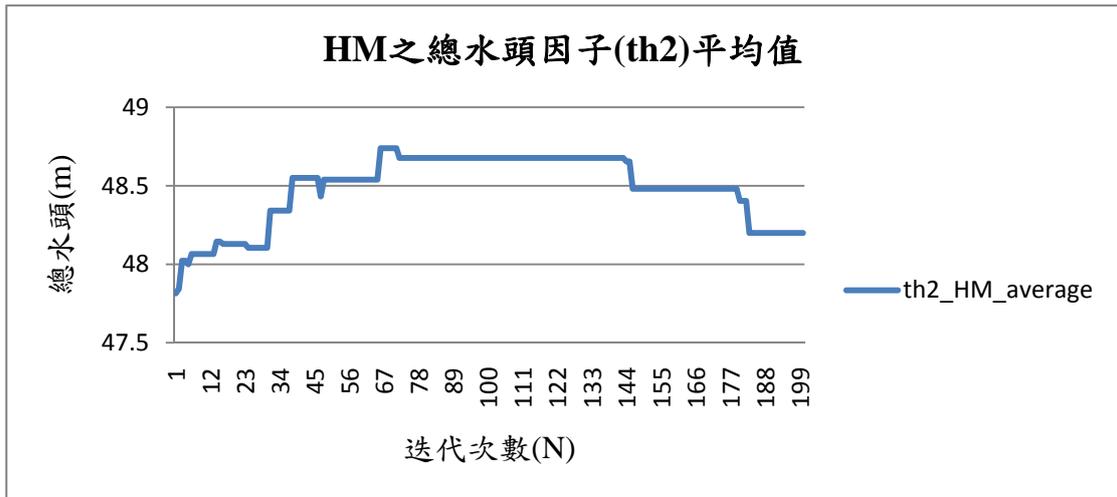


圖 5.94 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th2)之關係圖

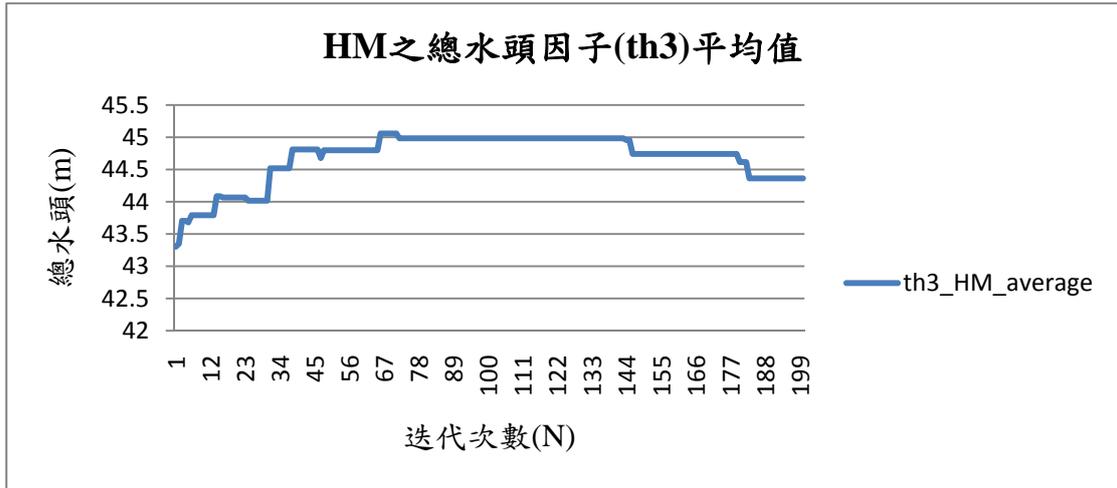


圖 5.95 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 總水頭因子(th3)之關係圖

此外，將 5 個待定變數之 HM 平均值與迭代次數關係圖分別表示為圖 5.96 至圖 5.100。其中 cut_end 約收斂至 204，k_v_head 約收斂至 3.4×10^{-4} cm/sec，k_h_head 約收斂至 7.8×10^{-4} cm/sec，n_{k_v} 約收斂至 2，n_{k_h} 約收斂至 3。

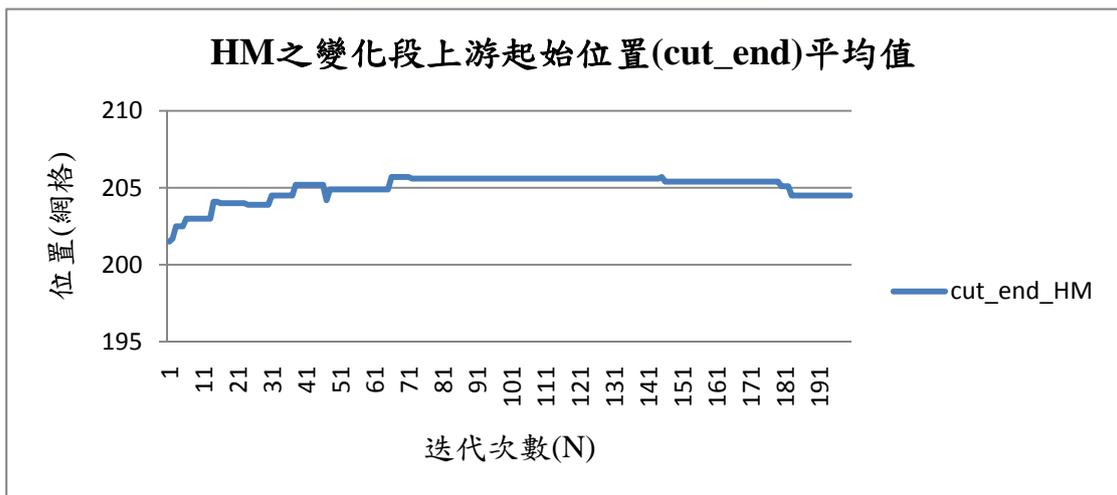


圖 5.96 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 變化段上游起始位置 (cut_end)之關係圖

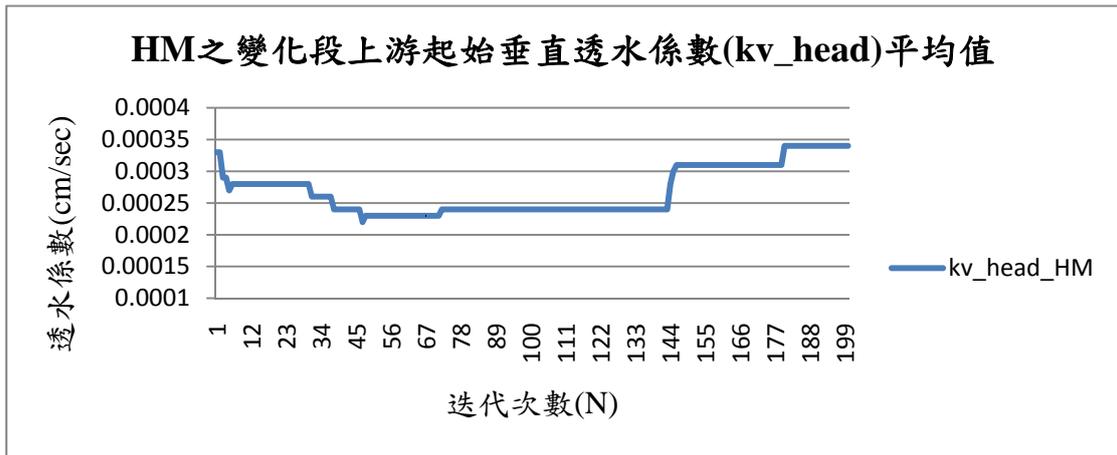


圖 5.97 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 變化段上游起始垂直透水係數(kv_head)之關係圖

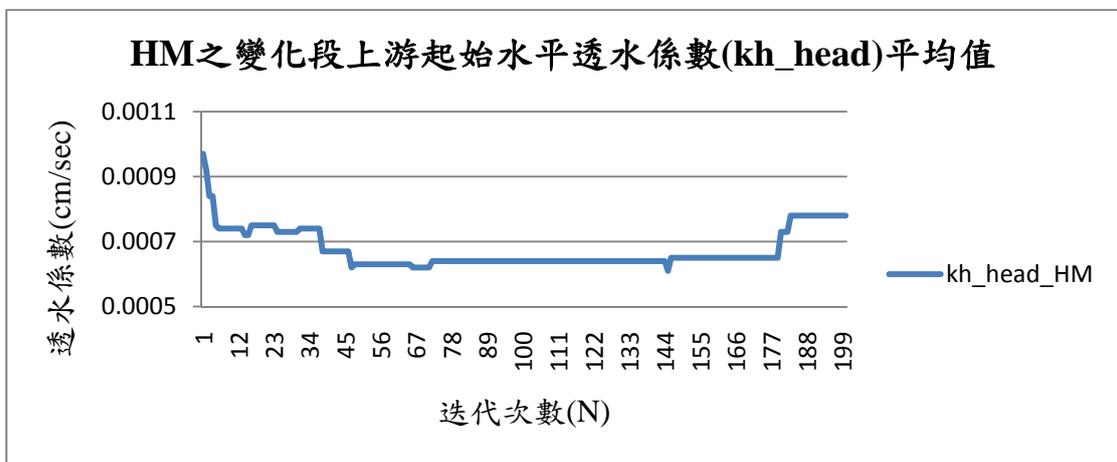


圖 5.98 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 變化段上游起始水平透水係數(kh_head)之關係圖

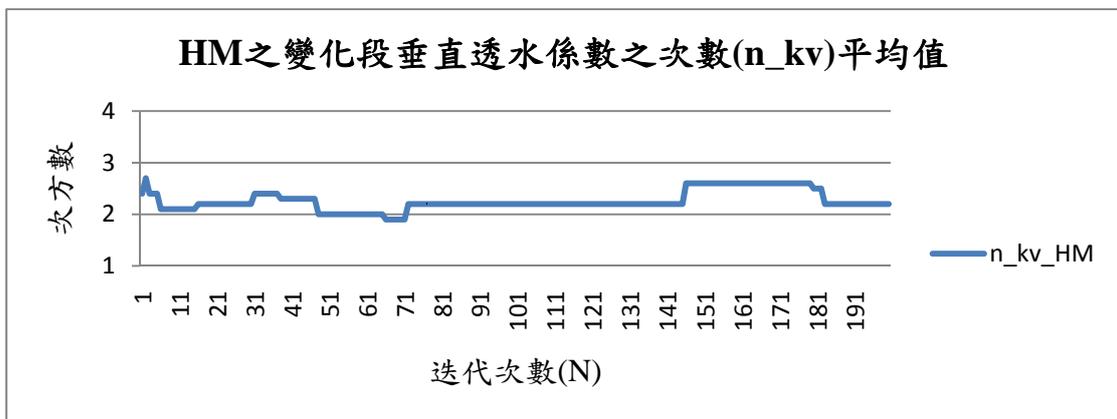


圖 5.99 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 變化段垂直透水係數之次數(n_kv)之關係圖

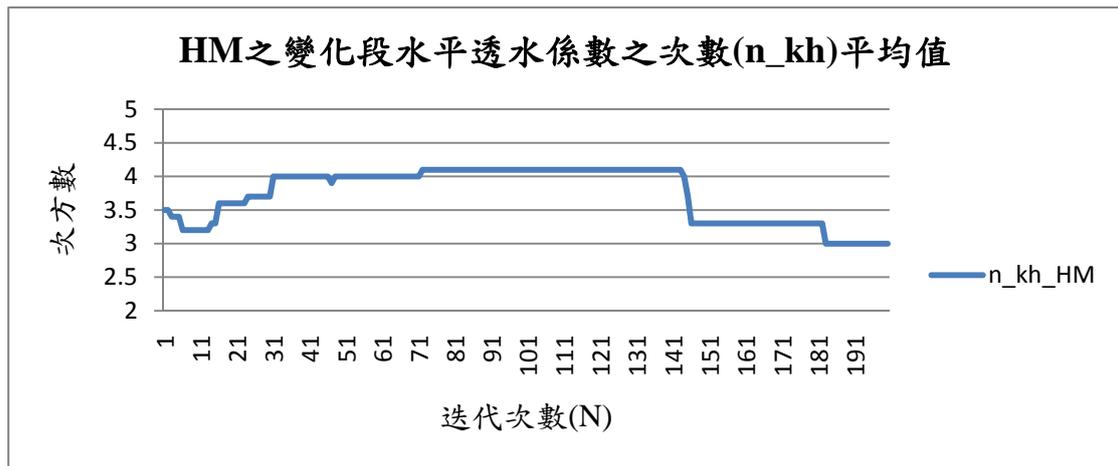


圖 5.100 新山壩漸進式之迭代次數與 HM 變化段水平透水係數之次數(n_kh)之關係圖

迭代 200 次中最佳目標函數值計算結果為第 183 次

(N_search=183)，目標函數值(f_{\min_obj})為 0.0072499。目標因子總壩體滲流量(HM_Q)為 129.1 CMD，與目標值 120 CMD 相差不到 10 CMD；而總水頭之目標因子 th1 最佳值為 51.17 m，與目標值 53m 差 2m 內；水頭之目標因子 th2 最佳值為 47.9m，與目標值 48.5m 差 2m 內；水頭之目標因子 th3 最佳值為 44.19m，與目標值 43m 差 2m 內，結果標示於圖 5.101 之飽和度圖上。此外，將搜尋之最佳待變數值標示於圖 5.102 壩材分布圖中。

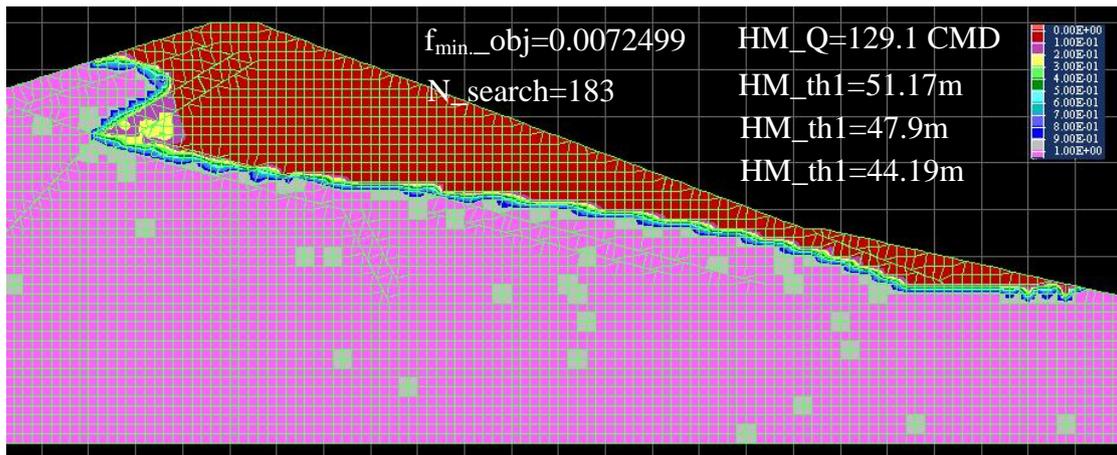


圖 5.101 新山壩漸進式之 HM 最佳搜尋結果之飽和度圖

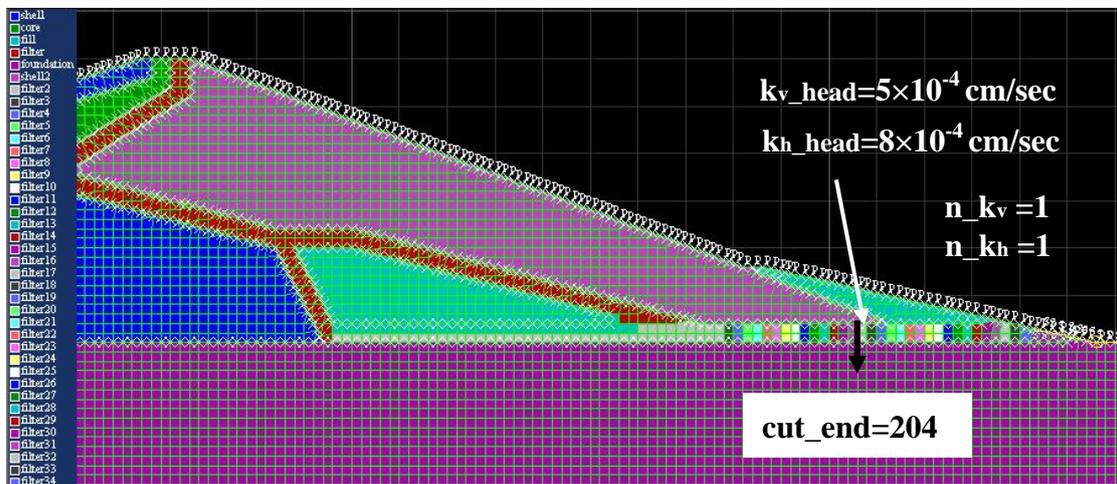


圖 5.102 新山壩漸進式之 HM 最佳搜尋結果之壩材變數圖

5.5.3 小結

由以上三種不同最佳化問題搜尋結果顯示：

1. 針對三種假設透水性分布之最佳化分析之收斂性均佳；
2. 三個水位井水頭目標因子(th1、th2、th3)均隨搜尋迭代過程之水頭升降情形頗為一致；
3. 最佳和弦之各目標因子(總滲流量與三個水位觀測井之水頭)均在目標容許變化範圍內，即總滲流量正負相差 20 CMD 內，總水頭正負相差一網格大小(2 m)。
4. 三種假設透水性分布型態之變化段範圍(即水平濾層之網格 190 至網格 221)均相同情況下，依搜尋結果顯示：由上游往下游方向之起始位置幾乎大於網格 200，此可說明本研究模擬之新山壩水平濾層段，需近下游出水口處透水性變好(透水係數大於 10^{-4} cm/sec)，才能解釋並模擬出現地實測數據之情形。
5. 比較此三種假設透水性分布型態之最佳搜尋結果，其中以第三種漸進式透水性分布型態經最佳化分析求解結果與目標觀測因子最為接近，如圖 5.101 上所標示之數據。

第六章 結論與建議

本章綜合歸納研究結果及提出本研究結論，並提出建議，供未來相關研究議題或以此類最佳化演算作為大地工程逆算求解應用之參考。

6.1 結論

本研究以和弦搜尋最佳化演算法進行反算分析，先以鯉魚潭壩，與新山壩虛擬案例驗證最佳化反算之模型；再以新山壩案例配合實際觀測與量測數據擬定兩種情境，作為本研究以啟發式最佳化演算進行反算分析之案例。由研究結果可獲得以下結論：

1. 本研究將啟發式最佳化演算法應用於實際工程案例之土石壩滲流分析反算求解，可說明此方法之可行性與有效性。
2. 本研究結合最佳化演算法與其他工程分析軟體，以廣用地工分析軟體 FLAC 作為計算引擎。主要係藉資料傳遞至外部檔案方式進行兩種不同軟體間之溝通，可達到整體最佳化搜尋過程為自動化之形式。
3. 由兩個驗證例之結果顯示，以壩體總滲流量或加上水頭作為目標觀測因子，能有效反映於壩材透水係數求解，並且與真實值相近。

4. 新山壩驗證案例之待定變數數量為鯉魚潭壩驗證案例之兩倍，其計算量增加僅約為 2.7 倍，由此可看出對於變數值之多種組合問題所求解時間，不會因變數量增加使得搜尋迭代次數呈指數上升之趨勢。
5. 本研究所研擬之和弦搜尋最佳化演算，可達到啟發式最佳化演算法之快速收斂之求解效能，又避免陷入局部解。
6. 由兩個驗證例結果顯示，假設之部分壩材透水係數為待定變數，經迭代過程，均能有效快速收斂至與原設計值相近之範圍內，不過，隨著迭代次數增加，函數解每次更新，所需之搜尋次數相對增加，以致越後期越需耗費更多搜尋時間才能更逼近目標值。
7. 一般限制條件越多表示問題特性相對較複雜，不過與變數相關之邊界限制條件越多，將會縮小搜尋範圍，使得進行目標函數計算之前能先除去不符合之條件，避免耗費太多不必要的計算時間或資源。以新山壩案例兩種情境之問題條件與總迭代次數為例，情境 1 為單純假設壩體內存在一高透水路徑，並限制邊界範圍於下游殼層內；而情境 2 除了假設高透水路徑為幾何形狀外，其路徑厚度也設定為變數且不隨 x 位置不同而改變，其邊界限制條件除了須滿足在下游殼層內之外，還必須位於水位觀測井間之水位面

以上。因此情境 2 對於情境 1 之問題表現相對較複雜，不過情境 2 之總迭代次數(115 次)反而比情境 1 之總搜尋次數(200 次)來得少。

8. 由新山壩案例兩種情境反算結果顯示，目標函數值雖能有效收斂，但並非收斂至函數值為零之目標，而是收斂至某特定值，且主要隨距離因子做函數值收斂，研判當有某些觀測因子對於此問題型態之求解，無法展現其作用亦或是定義最佳化問題之數學模式化時，問題本身就存在缺陷或是沒充分將問題性質以公式表達出來。

9. 由本研究反算結果推論，應可排除庫水經下游殼層之高透水通道造成下游壩面平台處滲出水，且應與浸潤面並無關連。研判壩面平台處滲出水較可能為下游殼層中因為材料透水性不盡均勻，下雨入滲後留在低透水性殼層材料之棲止水，慢慢迂迴經過較為透水之通路流出所致。

10. 由新山壩案例現況之綜合探討結果顯示：

(1) 常年監測之庫水位與降雨量之 D4 量水堰之滲漏量(即本研究模擬之新山壩橫斷面於下游坡面平台處附近搜集之滲流量)，明顯受降雨強烈影響。整理 D4 量水堰之滲漏量長年監測資料，顯示高庫水位並排除明顯降雨影響，其滲流量趨近於零甚至等於零之情形。

(2) 為嘗試以數值模擬解釋新山壩實際之觀測井水位與總壩體滲流量，假設壩體濾層之透水性較差，但下游側(靠壩趾出口段)其滲透性逐漸變佳，藉以此方式可模擬並解釋新山壩案例現況之實測數據。

11. 針對新山壩近下游側之水平濾層之透水係數變化段最佳化求解之結果顯示，最佳和弦之各目標因子(總滲流量與三個水位觀測井之水頭)均可收斂至目標容許變化範圍內。模擬結果顯示:當水平濾層較上游側之透水性偏低(低於原假設設計值)，而近下游出水口處透水性轉佳(透水係數大於 10^{-4} cm/sec)狀況下，方可解釋並模擬出大壩下游水頭實測數據之分布情形。

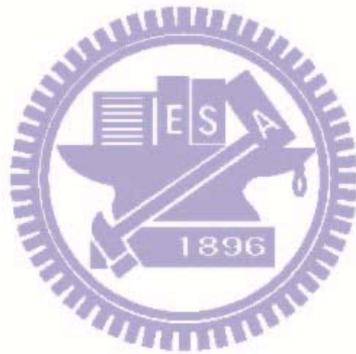


6.2 建議

1. 本研究所使用之和弦搜尋演算法之參數設定(HMCR、PAR、bw)均為定值，且為經過數次測試結果判斷後所選定之值。因此，未來可配合迭代過程設定參數為動態模式，使得一開始搜尋解能更加多樣化與全域性，並隨著迭代次數增加，慢慢提升解之收斂性，以加快整體求解之效率。

2. 本研究所使用之 HMS 均設定為 10，且參數設定值也較為主觀性之設定，因此未來研究可進一步針對不同參數值設定作參數之探討。
3. 本研究以 MATLAB 為主控伺服並配合 FLAC 為計算引擎進行滲流分析之最佳化求解，求解搜尋過程為一次迭代進行一個計算，而非一次迭代進行一組(數個)計算之主要原因為，FLAC 佔用時間超過 99%。因此對於設計變數為連續變數形式且變數量小於 3 個時，可考慮令 PAR 參數值設定大一些(設定值仍是要以各問題型態應用不同而做調整)，或是配合 TS 最佳化演算法之短期記憶之技巧，以避免重複計算、耗費時間。
4. 本研究僅針對新山壩現況之浸潤面模擬與總壩體滲流量做進一步探討，尚未針對下游平台處滲漏水情形做完整解釋，因此建議後續可針對此部份以最佳化求解法進行求解，以檢視是否因壩體殼層內部存在施工介面或局部棲止水等因素，使得雨水入滲至殼層後將各個局部透水通道連通，最後在匯流至下游坡面附近出漏。
5. 由此二維模擬結果可看出，壩體內部各材料分佈是不均勻的，更何況是實際壩體為三維空間分佈。因此，對於探討土石壩體內部之最佳化問題時，不妨先藉由現地試驗、監測與鑽探等有限資訊，

盡可能瞭解各現象後，再開始進行最佳化演算法之問題模式化，
以達到使用最佳化演算法進行最佳化問題反算分析之目的。



參考文獻

1. Abbaspour, K. C., Schulin, R. and van Genuchten M. Th., “Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization” *Advances in Water Resources*, vol. 24, pp. 827-841, 2001.
2. Abido, M. A., “Robust design of multimachine power system stabilizers using simulated annealing” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 15, no. 3, pp. 297-304, 2000.
3. Abido, M. A., “Optimal power flow using particle swarm optimization” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 24, pp. 563-571, 2002.
4. Alexandre, E., Cuadra, L. and Gil, R., “Sound classification in hearing aids by the harmony search algorithm” Geem, Z. W.(Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 173-188, 2009.
5. Ayvaz, M. T., “Identification of groundwater parameter structure using harmony search algorithm” Geem, Z. W.(Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 129-140, 2009.
6. Bell, J. E. and McMullen, P. R., “Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 18, pp. 41-48, 2004.
7. Camp, C. V., Pezeshk, S. and Cao, G., “Optimized design of two-dimensional structures using a genetic algorithm” *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, no. 5, pp. 551-559, 1998.
8. Ceylan, H. and Ceylan, H., “Harmony search algorithm for transport energy demand modeling” Geem, Z. W.(Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 163-172, 2009.
9. Chang, W. A. and Ramakrishna, R. S., “A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 6, pp. 566-579, 2002.
10. Cheng, Y. M. et al., “Partical swarm optimization algorithm for the location of the critical non-circular failure surface in

- two-dimensional slope stability analysis” *Computers and Geotechnics*, vol. 34, pp. 92-103, 2007.
11. Cheng, Y. M., Li, L. and Chi, S. C., “Performance studies on six heuristic global optimization methods in the location of critical slip surface” *Computers and Geotechnics*, vol. 34, pp. 462-484, 2007.
 12. Cheng, Y. M., “Modified harmony methods for slope stability problems” Geem, Z. W.(Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 141-162, 2009.
 13. Chiang, C. L., “Improved genetic algorithm for power economic dispatch of units with valve-point effects and multiple fuels” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 1690-1699, 2005.
 14. Dell'Amico, M. and Trubian, M., “Applying tabu-search to the job-shop scheduling problem” *Annals of Operations Research*, vol. 41, pp. 231-252, 1993.
 15. Fesanghary, M., “Harmony search applications in mechanical, chemical and electrical engineering” Geem, Z. W.(Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 71-86, 2009.
 16. Fesanghary, M., “An introduction to the hybrid HS-SQP method and its applications” Geem, Z. W. : *Recent Advances in Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 270, pp. 99-109, 2010.
 17. FLAC manual, Version 5.0, Itasca Consulting Group, Ins., USA, 2001.
 18. Gao, X. Z., Wang, X. and Ovaska, S. J., “Harmony search methods for multi-modal and constrained optimization” Geem, Z. W.(Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 39-51, 2009.
 19. Geem, Z. W., Tseng, C. L. and Williams, J. C., “Harmony search algorithms for water and environmental systems” Geem, Z. W.(Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 113-127, 2009.
 20. Geem, Z. W., “State of the art in the structure of harmony search algorithm” Geem, Z. W. : *Recent Advances in Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 270, pp. 1-10, 2010.
 21. Gendreau, M., Hertz, A. and Laporte, G., “A tabu search heuristic for the vehicle routing problem” *Management Science*, vol. 40, no.

- 10, pp. 1276-1290, 1994.
22. Gendreau, M., "Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching" *Transportation Science*, vol. 33, no. 4, pp. 381-390, 1999.
 23. Ingram, G. and Zhang, T., "Overview of applications and developments in the harmony search algorithm" Geem, Z. W.(Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 15-37, 2009.
 24. Kariuki, B. M. et al., "The application of a genetic algorithm for solving crystal structures from powder diffraction data" *Chemical Physics Letters*, vol. 280, pp. 189-195, 1997.
 25. Lee, K. S. and Geem, Z. W., "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice" *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 194, pp. 3902-3933, 2005.
 26. Mahdavi, M., Fesanghary, M. and Damangir, E., "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems" *Applied Mathematics and Computation*, vol. 188, pp. 1567-1579, 2007.
 27. Mahdavi, M., "Solving NP-complete problems by harmony search" Geem, Z. W.(Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 53-70, 2009.
 28. Maier, H. R. et al., "Ant colony optimization for design of water distribution systems" *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 129, no. 3, pp. 200-209, 2003.
 29. Mukhopadhyay, A. et al., "Population-variance and explorative power of harmony search: An analysis" in *Proc. 2nd MATEIT—Organized at C*, vol. 37, New Delhi, India, pp. 775-781, 2008.
 30. Nakano, R. and Yamada, T., "Conventional genetic algorithm for job shop problems" *Proc. 4th Int. Conf. on Geneting Algorithms*, pp. 474-479, San Diego, CA, 1999.
 31. Park, J. B. et al., "A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost functions" *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 34-42, 2005.
 32. Panchal, A., "Harmony search in therapeutic medical physics" Geem, Z. W.(Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 189-203, 2009.

33. Rajendran, C. and Ziegler, H., "Ant-colony algorithms for permutation flowshop scheduling to minimize makespan/total flowtime of jobs" *European Journal of Operational Research*, vol. 155, pp. 426-438, 2004.
34. Reklaitis, G. V., Ravindran, A. and Ragsdell, K. M., "Engineering Optimization : Methods and Applications", vol. 1, 2
35. Saka, M. P., "Optimum design of steel skeleton structures" Geem, Z. W. (Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 87-112, 2009.
36. Svergun, D. I., "Restoring low resolution structure of biological macromolecules from solution scattering using simulated annealing" *Biophysical Journal*, vol. 76, pp. 2879-2886, 1999.
37. van Laarhoven, P. J. M., Aarts, E. H. L. and Lenstra, J. K., "Job shop scheduling by simulated annealing" *Operations Research*, vol. 40, no. 1, pp. 113-125, 1992.
38. Wachowiak, M. P. et al., "An approach to multimodal biomedical image registration utilizing particle swarm optimization" *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 3, pp. 289-301, 2004.
39. Wang, C. M. and Huang, Y. F., "Self-adaptive harmony search algorithm for optimization" *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 2826-2837, 2010.
40. Xu, H. et al., "Harmony search optimization algorithm: Application to a reconfigurable mobile robot prototype" Geem, Z. W. : *Recent Advances in Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 270, pp. 11-22, 2010.
41. Yang, X. S., "Harmony search as a metaheuristic algorithm" Geem, Z. W.(Ed.) : *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*, SCI, vol. 191, pp. 1-14, 2009.
42. 徐業良，「工程最佳化設計」，國立編譯館，台北，民國八十六年。
43. 莊勝雄譯，「工程最佳化—方法與應用」，國立編譯館，台北，民國八十四年。

44. 陳冠亨，「土石壩滲流相關之破壞型態與參數探討」，國立交通大學，碩士論文，民國九十五年。
45. 經濟部水利署中區水資源局，「鯉魚潭水庫第一次定期安全評估報告」，民國九十六年。
46. 張斐章，張麗秋，「類神經網路導論：原理與應用」，滄海書局，民國九十九年。
47. 國立交通大學，「新山水庫壩體滲流路徑調查計畫成果報告書」，台灣自來水公司第一區管理處，民國九十九年。
48. 林志平等編著，「新山水庫滲漏調查與機制探討」，地工技術，第 126 期，第 41-52 頁，民國九十九年。

