

# 實數編碼遺傳演算法於樁基礎低價化設計之應用

鍾明劍<sup>1</sup> 莊德興<sup>2</sup> 黃俊鴻<sup>2</sup>

1.財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心研究員

2.國立中央大學土木工程學系教授

## 摘要

本文應用實數編碼遺傳演算法進行場鑄式群樁基礎的低價化設計。群樁基礎設計以工程造價為目標函數，其數學模型包含樁長、樁徑、樁帽厚度、兩向樁距以及兩向樁數等七個獨立的離散設計變數。束制條件是根據日本及國內基礎設計規範來建立，因設計時亦針對樁帽與基樁進行配筋，以配筋結果建立基樁斷面的 P-M 曲線，藉以檢核基樁強度，故 RC 設計規範之相關規定亦在束制條件中考慮，而 RGA 中係採懲罰函數法處理相關的束制條件。文中以日本「道路橋耐震設計相關資料集」中的一個 5 跨連續 I 型鋼橋下部樁基礎構造作為設計案例，RGA 的參數分別取族群數為 30 個個體、遺傳代數為 200 代、交配機率為 0.8 和突變機率為 0.10 進行設計，經 100 次的測試，其平均工程造價與標準偏差則分別為 1,450,872 元和 34,848 元，相較於全域最佳解(1,391,274 元)，其平均誤差約為 4.28%，其中找到全域最佳解的機率約為 15%。

關鍵字：實數編碼遺傳演算法、低價化設計、樁基礎。

## MINIMUM COST DESIGN OF PILED FOUNDATIONS USING REAL-CODED GENETIC ALGORITHM

### ABSTRACT

This paper reports the application of real-coded genetic algorithm (RGA) to the minimum cost design of piled foundations. The objective function is the combined costs of soil excavation, pile cap, piles, and soil backfill. The design variables, including pile length, pile diameter, depth of pile cap, pile spacing, and pile number, are all discrete. RGA is a search technique based on the concept of natural selection inherent in the natural genetics, which combines an artificial survival of the fittest with genetic operators abstracted from nature. RGA consists of three basic operations: selection, crossover or mating, and mutation. However, the problem of a piled foundation design belongs to a multi extreme values problem. The efficiency and validity of the RGA have been verified by comparing the solutions with the global optimum solutions obtained from exhaustive search method (ESM). In this paper, when the parameters of RGA, including popular size, generation number, crossover rate, and mutation rate, are equal to 30, 200, 0.8, and 0.10 respectively. The comparative results show that the mean error of the RGA solutions is around 4.28% only, and the probability of finding global optimal solution is 15%.

*Key Words:* real-coded genetic algorithm, minimum cost design, piled foundation.

### 一、前言

樁基礎為常見之橋梁基礎，廣泛地應用於軟弱地層或河川地形，以克服地基承载力不足或河川淘刷等問題。在樁基礎設計中，不同的基樁配置方式(包括基樁長度、基樁直徑、樁帽厚度、基樁間距及基樁數量等)都會影響其工程經費。尤其在許多重大工程中，當群樁數量需求眾多時，對工程經費的影響也就愈大。然而限於時間與人力，目前工程界採用的樁基礎設計方法多屬於試誤設計程序，只要依經驗選取之設計解，經分析後滿足設計規範的要求，通常就完成該設

計案。惟此種設計結果往往偏於保守，忽略對經濟性之要求。在目前營建產業高度競爭下，大型工程建設多採 BOT 方式執行，能進行兼具安全與經濟性之設計，在市場上才有高度之競爭力，這也突顯工程最佳化設計之重要性及急迫性。

文獻[1]曾以「日本道路橋耐震設計相關資料集」[2]中的一個 5 跨連續 I 形鋼橋下部之樁基礎構造案例進行探討。研究中發現：以竭盡搜尋法(exhaustive search method)所找出之群樁基礎的全域最低價設計方案約略比原設計結果節省 31.8%的造價，這項研究結果充分顯示傳統試誤設計程序無法確保設計結果的經濟性。

雖然竭盡搜尋法可在離散空間找出全域最佳解，但此法必須評估離散設計變數的所有可能組合，相當耗時[1]。此外，一般工程設計上亦僅需合理的近似最佳解即可，因此本文的主要目的便是希望透過最佳化演算法，使樁基礎在滿足相關規範的規定下，可以在較少時間內獲得近似低價化的設計結果。

最佳化理論於工程設計與規劃之應用雖已有多年的歷史，但於樁基礎工程之應用仍然相當有限，且鮮少以實務設計的角度來探討低價化的設計問題[3]。為了彌補上述文獻沒有考量實務工程設計需求的缺失，文獻[4]、[5]分別嘗試利用相對差商法(relative difference quotient algorithm)與離散拉格朗日法(discrete Lagrangian method)進行群樁基礎進行配置低價化設計。以文獻[2]案例為例，相對差商法與離散拉格朗日法所得設計解的費用僅較全域最佳解多 1.69% 與 2.01%，惟相對差商法與離散拉格朗日法均屬鄰點搜尋法(neighborhood search algorithms)，易陷入局部最佳解而無法找出全域最佳解。故本文將採實數編碼遺傳演算法(real-coded genetic algorithm)進行低價化設計，此法係屬高階啟發式演算法(meta-heuristic algorithms)，且最被廣為應用於樁基礎最佳化設計之問題[3]，此法可透過全域多點隨機搜尋技巧，避免陷入局部最佳解，提高全域最佳解的搜尋能力。

文中先說明樁基礎低價化設計的數學模型，並說明本文所採實數編碼遺傳演算法的演算流程，再以文獻[2]的樁基礎構造為例，探討此演算法的搜尋性能，最後提出此研究的結論與建議。

## 二、樁基礎低價化設計的數學模型

### 2.1 群樁基礎設計與分析流程

本文採用的群樁基礎設計與分析流程可如圖 1 所示[3]，流程中分別按常時及地震時狀態進行設計，其中地震時狀態是採中小地震的震度法設計，設計中可考量：(A)土壤液化；(B)群樁效應；(C)樁帽阻抗；(D)樁帽所需最小厚度等計算。有關樁基礎分析模式、基樁與樁帽結合設計等部分皆採規範[6]、[7]之規定，而樁帽及基樁配筋部分則以規範[8]、[9]進行設計。

### 2.2 設計變數的選定

本文以場鑄樁施作的橋梁群樁基礎作為研究對象，假設所有基樁長度皆相等，且基樁呈矩形對稱排列。樁基礎低價化設計是以工程造價作為目標函數，採用之離散設計變數包括基樁長度( $L_p$ )、基樁直徑( $D$ )、樁帽厚度( $H_c$ )、兩向基樁間距( $S_L$ 、 $S_T$ )及兩向基樁數量( $N_L$ 、 $N_T$ )等共七個，其中除了基樁數量為整數外，其他變數皆為離散實數。此七個獨立設計變數涵蓋基樁數量、配置位置、基樁與樁帽幾何尺寸等重要設計變數，係屬綜合設計問題，較一般單獨考量構材斷面或形狀之結構最佳化設計問題複雜。

### 2.3 目標函數與束制條件

本文定義低價化設計係指滿足現行規範條件下，工程造價最低的設計方案。而工程造價若依工程進行順序可分為土方開挖費用、基樁費用、樁帽費用及回填夯實費用，各項費用的詳細公式請參考文獻[3]。本文參考「營建物價」[10]和國內知名顧問公司提供之單價整理如表 1 所示，各項單價均包含材料、機具和施工費用。

群樁基礎設計的束制條件是根據文獻[6-9]等規範進行制訂，數學模式的束制條件包含：(A)工址用地限制；(B)基樁間距限制；(C)基樁長度限制；(D)樁帽剪力限制；(E)基樁容許承载力限制；和(F)樁頭容許變位量限制等六大類。作者於文獻[3]中有詳細說明並列舉公式，本文不重複贅述。

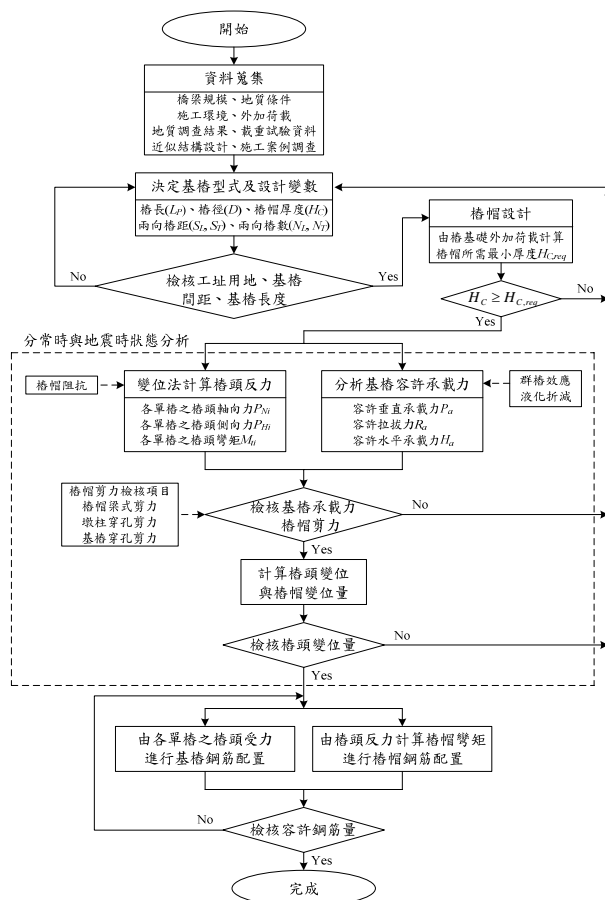


圖 1 群樁基礎設計與分析流程

表 1 物料單價(含材料、機具和施工費用)

項目	單價	
土方開挖費用	320 NTD/m <sup>3</sup>	
回填夯實費用	430 NTD/m <sup>3</sup>	
水中混凝土(240 kgf/cm <sup>2</sup> )	2,100 NTD/m <sup>3</sup>	
水中混凝土(280 kgf/cm <sup>2</sup> )	2,400 NTD/m <sup>3</sup>	
竹節鋼筋(4200 kgf/cm <sup>2</sup> )	18,800 NTD/ton	
基礎模版製作及拆裝	300 NTD/m <sup>2</sup>	
基樁打設 (D=100cm)	沖積層	2,000 NTD/m
	礫石層	3,000 NTD/m
	軟岩	4,500 NTD/m

## 三、實數編碼遺傳演算法

在遺傳演算法(genetic algorithms, GAs)的演算過程中，設計變數可以二位元字串來表示，稱為二位元編碼遺傳演算法(binary genetic algorithm, BGA)，亦可直接以實數數值表示，稱為實數編碼遺傳演算法(RGA)，由於 RGA 與 BGA 的優劣並無定論，演算過程中只須選用適當的演算子及輔助策略，皆可獲得良好的成效。本文係採用 RGA 進行演算，其演算流程如圖 2 所示，並分述如后。

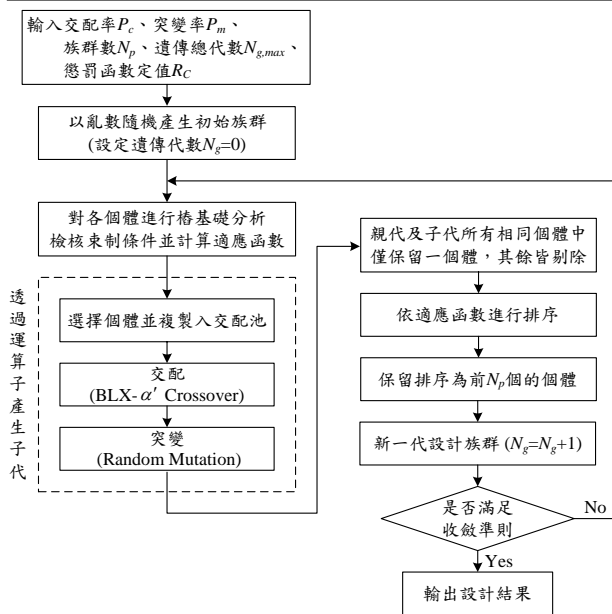


圖 2 RGA 演算流程圖

### 3.1 產生初始族群

因 RGA 採用隨機多點搜尋技巧，演算前須先產生一組初始族群(initial population)，以便進行後續演化的運算過程。決定每代(generation)的族群數(population size,  $N_p$ )後，本文採隨機方式產生族群內的所有個體，如果族群數夠多時，則族群內各個體應會均勻地分佈在設計空間中，可提高搜尋至全域最佳解的機會。

### 3.2 適應函數與束制函數的處理

族群中各個體的優劣是由適應函數(fitness function)來決定，適應函數可依個別問題的特性來決定，常與 GAs 處理束制函數的方法有關。對於含不等式束制條件的問題，大部分是採用傳統數學規劃法的觀念，將目標函數與束制函數予以加權組合得到一個無束制化的擬目標函數(pseudo objective function)，並將其定義為適應函數。為考量束制函數之影響，許多學者提出不同的方法，但其適用性與穩定性往往因問題而異[11]。文獻[12]曾有系統地整理常用於處理束制函數的方法，然而每種方法須根據所處理之問題去調整許多參數，就工程師而言，過多必須調整的參數，往往會使得演算法的親和力不足。由於須調整的參數過多時，參數選取對演算法搜尋性能的影響將會變大，故本文採用 static penalty method (SPM)處理束制函數的方法。

### 3.3 選擇及複製

RGA 在交配與突變前，須先從當代族群中選擇(select)兩個個體，並複製(reproduction)到交配池中作為親代個體。一般在選擇個體時主要係應用「優勝劣敗」的基本理念，挑選出族群中較合適的個體複製到交配池中進行交配。本文在選擇個體時的作法為：族群中每個個體皆亂數產生介於[0, 1]的實數，其數值小於交配率( $P_c$ )之個體則可逐一進入交配池中，而池中與其交配之個體則從族群中其餘個體進行隨機挑選。如族群中有十個個體而交配率為 0.8 時，若族群中有八個個體其亂數產生之數值小於 0.8，則逐一將

此八個個體放入交配池中，而與其交配之個體則隨機由族群中未進入交配池的九個個體中挑選，再透過交配運算子進行此兩個體之交配。此種作法主要用意在於讓每個個體有相同的機會進行交配，避免上述因過早收斂而錯失搜尋至全域最佳解的現象。

### 3.4 交配

兩個親代個體被選入交配池中進行交配(crossover)時，其交配的方法也相當多，目前 RGA 常採用 linear crossover [13]、simple crossover [13]、arithmetical crossover [14]、以及 BLX- $\alpha'$  crossover 方式[15]等交配策略。本文係透過亂數選取某一個設計變數做為交配點，親代個體中被選為交配點的設計變數係以 BLX- $\alpha'$  crossover 方式進行交配，而交配點之後的設計變數則以 simple crossover 方式進行交配。

### 3.5 突變

在遺傳演算過程中，突變運算子一般是以突變率( $P_m$ )作為控制個體中設計變數變異的機率，為一個介於[0, 1]的實數。目前 RGA 常採用 random mutation [14]、non-uniform mutation [14]、以及 Muhlenbein's mutation [16]等突變策略，本文考量 non-uniform mutation 和 Muhlenbein's mutation 所需以亂數決定之參數較多，將使 RGA 執行效率降低，故採用產生一次亂數即可決定新設計變數的 random mutation 方式進行突變。

### 3.6 挑選子代族群之個體

本文在 RGA 演算過程中，係將所有親代個體及透過運算子所產生之子代個體，按適應函數值進行排列後，選擇前  $N_p$  個較佳之個體做為新的子代族群。為了避免新的族群中出現相同個體，造成收斂早熟的現象，因此在突變之後，親代與子代個體中相同的個體僅需保留一個個體，其餘相同的個體則可移除。如果最後保留個體數小於  $N_p$ ，則再以隨機方式產生新的個體，使新一代的族群數維持為  $N_p$ 。由於本文於挑選子代個體的過程中，係將所有親代個體及透過運算子所產生之子代個體，按適應函數值進行排列後，選擇前  $N_p$  個較佳之個體做為新的子代族群。此作法的精神與 BGA 保留當代最佳個體[17]，或是特定比例親代個體[18]的菁英政策類似，皆可避免當代較佳的個體在交配和突變過程中發生變差的現象。

### 3.7 收斂準則

目前 RGA 仍然缺乏一個以強健數學理論所推導出的收斂準則，為了讓 RGA 演化不致陷入無窮迴圈，須預先設定結束規則，使 RGA 能依該條件終止演化循環。常用之收斂準則有(A)遺傳代數達到預先設定之遺傳總代數  $N_{g,max}$ ；(B)當代最佳解已連續  $N_{g,con}$  代未能再進化；(C)當個體的適應函數值已滿足預先設定的目標值；(D)所有個體的設計變數數值均趨向一致，亦即不再有更好的適應值出現時，即予以終止。上述收斂準則中，由於(B)及(C)的收斂準則中，要選擇適當的  $N_{g,con}$  或適應函數目標值係一件相當困難的事情，而(D)的收斂準則亦難以定出設計變數數值趨向一致的定義，故本文僅選擇(A)的收斂準則：遺傳代數達到預先設定之遺傳總代數  $N_{g,max}$  即予以終止，做為收斂準則。

## 四、案例分析

### 4.1 案例背景

本文以「道路橋耐震設計相關資料集」[2]內的設計例為例，此案例是針對5跨連續I形鋼橋下部之樁基礎構造進行設計，其樁基礎部分係採場鑄樁施作。表2為常時與地震時作用於樁基礎的設計荷載組合，其工址地表最大水平加速度係數為0.25。圖3為其地質剖面圖，土壤參數則如表3所示，此案例於設計時採用之安全係數如表4所示。

表2 橋腳構造整體作用外力

	$V_D$ (kN)	$H$ (kN)	$M$ (kN-m)
常時	13,162	0	0
地震時 (震度法)	橋軸方向(L)	10,562	2,476
	橋橫方向(T)	10,562	2,056

表3 土壤參數

深度(m)	土壤種類	SPT-N 值	單位重 ( $kN/m^3$ )	凝聚力 ( $kN/m^2$ )	摩擦角 (度)
0.0~2.7	回填土	5	17.0	-	24.0
2.7~5.2	黏性土	5	17.0	30.0	-
5.2~9.2	砂質土	10	17.0	-	27.0
9.2~12.7	黏性土	5	17.0	30.0	-
12.7~16.2	砂質土	15	19.0	-	30.0
16.2~40.0	砂質土	50	19.0	-	40.0

表4 安全係數

設計種類	點承力	摩擦力	拉拔力
常時設計	3	3	6
地震時設計	2	2	3

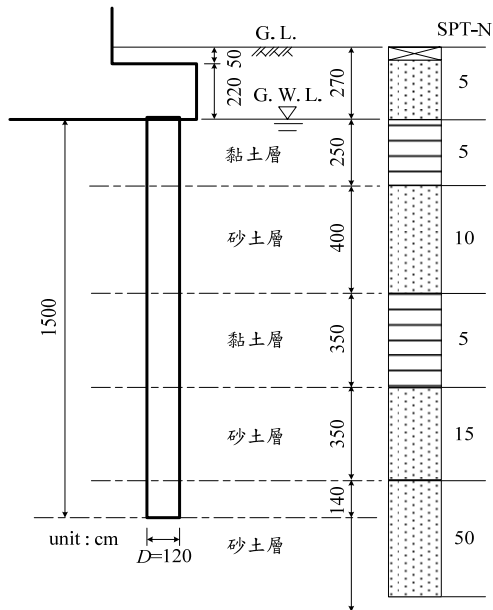


圖3 土質剖面圖

由圖3可知基礎座落於砂、黏土互層地盤，且地表下16.2m處即為堅硬的承載層(SPT-N為50)。此案例的原設計如表5所列，因原設計例並無相關單價可供參考，本文係依表1的工程單價進行估價，原設計的工程造價為2,039,924元。若將所有設計變數視為

離散變數，則透過竭盡搜尋[1]所求得之全域最佳解可見表5，竭盡搜尋所選定之各設計變數的範圍和增量如表6所示，歷經10,221,120次分析所得最佳解的工程造價僅1,391,274元，較原設計節省31.8%的經費，凸顯原設計不符合經濟性的需求。

表5 設計例的原設計方案與最佳設計方案

	$L_P$	$D$	$H_C$	$S_L$	$S_T$	$N_L$	$N_T$	Cost(NTD)
原設計	15.0	1.20	2.20	3.05	3.05	3	3	2,039,924
最佳設計	26.0	1.10	1.80	4.10	3.60	2	2	1,391,274

表6 設計變數的上、下限及增量

	下限	上限	增量
$L_P$ (m)	10.0	30.0	1.0
$D$ (m)	0.7	1.4	0.1
$H_C$ (m)	1.5	2.4	0.1
$S_L$ 、 $S_T$ (m)	2.0	4.5	0.1
$N_L$ 、 $N_T$	2	4	1

### 4.2 RGA 參數研究與搜尋性能

由於RGA的搜尋性能會受到族群數( $N_P$ )、交配率( $P_c$ )、突變率( $P_m$ )及遺傳總代數( $N_{g,max}$ )之影響，故本文將進行 $P_c$ 、 $P_m$ 及 $N_{g,max}$ 參數的探討，從中選擇較適當的參數值，再固定 $P_c$ 、 $P_m$ 及 $N_{g,max}$ 的參數值，進行 $N_P$ 參數的探討。

本文先以固定的 $N_P$ 進行 $P_c$ 、 $P_m$ 及 $N_{g,max}$ 等參數之選取，其中 $N_P$ 採用10個個體，而 $N_{g,max}$ 則分別選擇50、100、150及200代。文獻[19]曾建議 $P_c$ 可介於0.7~0.9之間， $P_m$ 可介於0.01~0.10之間，故此部分參數研究的 $P_c$ 分別採0.7、0.8及0.9， $P_m$ 分別採0.05及0.10進行探討。由於RGA係採隨機多點搜尋技巧，因此每次執行RGA所得之結果可能不同，故上述各種參數的案例皆重複以RGA進行100次分析，再進行統計分析。表7至表10分別係 $N_{g,max}$ 為50、100、150及200代時，RGA於不同 $P_c$ 及 $P_m$ 時之搜尋結果，圖4為不同 $P_c$ 及 $P_m$ 時RGA所得工程平均造價隨 $N_{g,max}$ 變化。

表7 不同 $P_c$ 及 $P_m$ 時RGA之搜尋結果( $N_{g,max}$ 為50代)

$P_c$	$P_m$	工程造價 (NTD)				平均分 析次數	最佳解 比例(%)
		平均值	最佳解	最差解	標準偏差		
0.7	0.05	1,534,365	1,397,052	1,765,549	67,380	708	0
	0.10	1,528,063	1,403,845	1,790,345	67,219	711	0
0.8	0.05	1,520,268	1,421,373	1,691,869	62,460	806	0
	0.10	1,520,100	1,403,712	1,703,467	59,805	809	0
0.9	0.05	1,510,910	1,397,052	1,693,643	59,169	911	0
	0.10	1,514,134	1,403,712	1,662,584	58,027	911	0

表8 不同 $P_c$ 及 $P_m$ 時RGA之搜尋結果( $N_{g,max}$ 為100代)

$P_c$	$P_m$	工程造價 (NTD)				平均分 析次數	最佳解 比例(%)
		平均值	最佳解	最差解	標準偏差		
0.7	0.05	1,510,680	1,397,052	1,655,170	56,099	1,407	0
	0.10	1,508,912	1,403,712	1,691,224	64,807	1,410	0
0.8	0.05	1,503,542	1,403,845	1,689,531	59,548	1,606	0
	0.10	1,498,216	1,391,274	1,655,170	57,200	1,611	2
0.9	0.05	1,495,436	1,391,274	1,647,920	52,960	1,812	1
	0.10	1,495,700	1,391,274	1,655,170	53,305	1,810	4

表 9 不同  $P_c$  及  $P_m$  時 RGA 之搜尋結果( $N_{g,max}$  為 150 代)

$P_c$	$P_m$	工程造價 (NTD)				平均分 析次數	最佳解 比例(%)
		平均值	最佳解	最差解	標準偏差		
0.7	0.05	1,504,758	1,397,052	1,655,170	56,682	2,104	0
	0.10	1,501,864	1,391,274	1,655,170	59,924	2,102	1
0.8	0.05	1,496,165	1,391,274	1,678,755	53,274	2,404	1
	0.10	1,492,333	1,391,274	1,652,094	57,363	2,409	5
0.9	0.05	1,492,928	1,391,274	1,647,920	51,829	2,714	2
	0.10	1,489,220	1,391,274	1,644,183	51,481	2,710	5

表 10 不同  $P_c$  及  $P_m$  時 RGA 之搜尋結果( $N_{g,max}$  為 200 代)

$P_c$	$P_m$	工程造價 (NTD)				平均分 析次數	最佳解 比例(%)
		平均值	最佳解	最差解	標準偏差		
0.7	0.05	1,503,715	1,391,274	1,655,170	56,983	2,802	1
	0.10	1,497,264	1,391,274	1,655,170	56,287	2,804	1
0.8	0.05	1,494,082	1,391,274	1,678,755	53,702	3,203	1
	0.10	1,489,032	1,391,274	1,644,183	56,069	3,204	5
0.9	0.05	1,491,210	1,391,274	1,644,183	51,420	3,615	3
	0.10	1,486,120	1,391,274	1,644,183	51,145	3,610	5

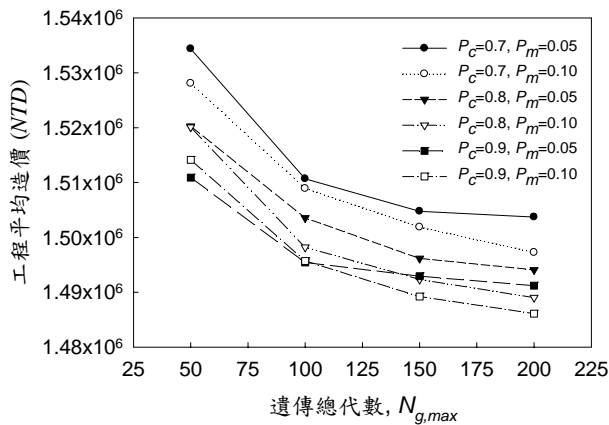


圖 4 不同  $P_c$  及  $P_m$  時 RGA 所得工程平均造價隨  $N_{g,max}$  變化

由表 7 至表 10 可看出平均分析次數明顯地與  $P_c$  及  $N_{g,max}$  具有近似線性關係，因  $P_m$  僅為交配後再決定是否需進行突變，因此幾乎不會影響平均分析次數。由圖 4 可知不論  $P_c$  及  $P_m$  的為何，工程平均造價皆會隨  $N_{g,max}$  的增加而降低。由相同的  $P_m$  可明顯地看出，工程平均造價會隨  $P_c$  提高而降低，惟其降低的趨勢有逐漸趨緩的現象；若從相同的  $P_c$  來觀察，不論  $N_{g,max}$  的為何， $P_m$  為 0.10 所得之工程平均造價均較  $P_m$  為 0.05 為低，因此建議  $P_m$  可採 0.10。此外，當  $N_{g,max}$  超過 100 代後，工程平均造價隨  $P_c$  提高而有趨緩的現象，由於  $P_c$  為 0.8 及 0.9 所得之工程平均造價差異不大，本文考量  $P_c$  為 0.9 時所需之分析次數較多，因此建議  $P_c$  可採 0.8 進行分析。

綜合上述評論，本文建議後續案例於 RGA 之分析時，可採用  $P_c$  為 0.8、 $P_m$  為 0.10 進行分析。此參數組合於本案例中，當  $N_{g,max}$  達 200 代時，RGA 有 5% 的機率搜尋至全域最佳解，且其工程平均造價為 1,489,032 元，與全域最佳解(1,391,274 元)約差 7.0%。

決定  $P_c$  為 0.8、 $P_m$  為 0.10 及  $N_{g,max}$  為 200 代後，本文取  $N_p$  為 5、10、20、30 個個體，分別以 RGA 進行參數研究，不同  $N_p$  時 RGA 之搜尋結果整理如表 11 所示。

表 11 不同  $N_p$  時 RGA 之搜尋結果

$N_p$	工程造價 (NTD)				平均分 析次數	最佳解 比例(%)
	平均值	最佳解	最差解	標準偏差		
5	1,528,102	1,427,735	1,689,314	62,931	1,600	0
10	1,489,032	1,391,274	1,644,183	56,069	3,204	5
20	1,459,222	1,391,274	1,584,811	35,692	6,400	9
30	1,450,872	1,391,274	1,571,590	34,848	9,597	15

由表 11 可知，最佳工程造價、最差工程造價、工程平均造價及其標準差，皆有隨  $N_p$  增加而有降低的趨勢。因 RGA 僅對不滿足約束條件進行懲罰，並非剔除此個體，且  $P_c$  與  $P_m$  皆為定值，故平均分析次數會與  $N_p$  具有近似線性關係。當  $N_p$  達 10 個以上時皆有機會搜尋至全域最佳解，且搜尋至全域最佳解的比例亦會隨  $N_p$  的增加而遞增。本文建議往後案例分析，可採用  $N_p$  為 30 個個體進行分析，此參數於本案例中有 15% 的機率搜尋至全域最佳解，且其工程平均造價為 1,450,872 元，與全域最佳解(1,391,274 元)僅差 4.28%。

## 五、結論與建議

文中以文獻[2]的 5 跨連續 I 形鋼橋下部之樁基礎構造為例，透過實數編碼遺傳演算法進行低價化設計，綜合本文所得之各項研究結果，茲摘要提出下列幾點結論與建議，以供各界參考。

### 5.1 結論

1. 本文數學模型所採用之樁基礎設計與分析模式考慮因素較前人研究完整務實，符合現行規範。可針對常時與地震時兩種狀況進行分析，分析時可彈性選擇是否考量土壤液化折減、樁帽阻抗或群樁效應等設計因素，並詳細估算各安全性檢核項目，最後透過基樁與樁帽所受之荷載，分別進行配筋設計。
2. 由本設計案例之分析，顯示透過 ESM 所得之全域最佳解較由試誤程序所得之原設計方案節省 31.8% 的經費，清楚顯示傳統試誤程序的設計不符合經濟性的需求。
3. 經測試，建議未來 RGA 的參數可分別取族群數為 30 個個體、遺傳代數為 200 代、交配率為 0.8 和突變率為 0.10 進行設計。
4. 本文的案例經 100 次的測試，其平均工程造價與標準偏差則分別為 1,450,872 元和 34,848 元，相較於全域最佳解(1,391,274 元)，其平均誤差約為 4.28%，其中找到全域最佳解的機率約為 15%，成效甚為良好。
5. 雖然 RGA 所需時間較鄰點搜尋法(如 DLM 或 RDQA)長，惟此類演算法係隨機產生初始解，不需要建議初始解，故可預期 RGA 於不同樁基礎設計案例均具有相似的性能表現。

### 5.2 建議

1. 本文僅針對某一設計實例進行分析探討並提供一般設計上的建議，未必適用於所有設計案例。
2. 本文建議之最佳化搜尋程序於處理離散非線性問題的能力是值得肯定的，且具有簡單的演算法則，值得更進一步的推廣與應用。
3. 本文所發展的樁基礎低價化設計已滿足一般工程設計之需求，未來可將此模式進程式化，以供各界使用。

---

## 誌謝

本文承蒙國科會提供專題計畫之補助(NSC 94-2622-E-008-009-CC3)，特此致謝。

## 參考文獻

- [1] 鍾明劍、黃俊鴻、莊德興，「群樁基礎設計模式與全域最佳解之應用」，結構工程，第二十一卷，第一期，第 122-139 頁 (2006)。
- [2] 日本道路協會，道路橋耐震設計相關資料集，日本道路協會，東京，第 2-1 ~ 2-139 頁 (1997)。
- [3] 鍾明劍，「樁基礎最佳化設計之研究」，博士論文，國立中央大學土木工程學系，中壢 (2006)。
- [4] 鍾明劍、黃俊鴻、莊德興，「相對差商法於群樁基礎設計最佳化之應用」，中國土木水利工程學刊，第十九卷，第一期，第 155-165 頁 (2007, EI)。
- [5] 鍾明劍、莊德興、黃俊鴻，「場鑄群樁基礎的低價化設計」，2005 年電子計算機於土木水利工程應用研討會，台南，台灣，第 401-407 頁 (2005)。
- [6] 日本道路協會，道路橋示方書・同解說 - 下部構造編，日本道路協會，東京 (2002)。
- [7] 日本道路協會，道路橋示方書・同解說 - 耐震設計編，日本道路協會，東京 (2002)。
- [8] 內政部建築研究所，建築物基礎構造設計規範，營建雜誌社，台北 (2001)。
- [9] 中國土木工程水利學會，混凝土工程設計規範與解說-土木 401-93，科技圖書，台北 (2005)。
- [10] 營建研究院，「營建物價」，台灣營建研究院，台北 (2004)。
- [11] Michalewicz, Z., and Schoenauer, M., "Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems," *Evolutionary Computation*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-32 (1996).
- [12] Coello, C.A., "Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: A Survey of the state of the art," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 191, No. 12, pp. 1245-1287 (2002).
- [13] Wright, A.H., "Genetic algorithm for real parameter optimization," *Foundations of Genetic Algorithms 1*, San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, pp. 205-218 (1991).
- [14] Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, New York (1992).
- [15] Eshelman, L.J., and Schaffer, J.D., "Real-coded genetic algorithms and internal-schemata," *Foundations of Genetic Algorithms 2*, San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, pp. 187-202 (1993).
- [16] Muhlenbein, H., and Schlierkamp, V.D., "Predictive models for the breeder genetic algorithm: I. Continuous parameter optimization," *Evolutionary Computation 1*, pp. 25-49 (1993).
- [17] De Jong, K.A., "An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems," Ph.D. Dissertation, University of Michigan (1975).
- [18] 余書維，「遺傳演算法則於群樁低價化設計之應用」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，中壢 (2003)。
- [19] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Massachusetts (1989).