

## 第五章 最佳化建議策略分析

### 5.1 緣由

在第四章所提及的橋梁延壽評估策略，乃是介紹評估橋梁本體對於橋梁現況以及環境對此造成影響的一個判斷標準，利用判斷流程圖的方式，初步評估橋梁整體狀況，了解劣化情形，提供後續作詳細檢測時的一個參考依據，最後並對應適時的工法，完成整個評估動作；並且藉由資料的收集與累計，以其最終形成橋梁無論是基本資料、檢測、劣化狀況、修補工法等編碼的資料庫。但是即使成為橋梁評估系統資料庫，其最終的目的，歸結於決策者判斷該橋梁該修或不該修，所以即使提供了修補工法和各種劣化程度，必須有一套最佳化的建議模組，來考慮橋梁在整個生命週期表現時，利用最少的維護成本，發揮最大的功能回覆效益。

而在以往的橋梁生命週期成本分析，乃是利用一簡單的線性迴歸進行橋梁劣化趨勢曲線，點出劣化維修發生的時間點，但是橋梁劣化隨著各種不同的構件、所處的環境以及不同的載重方式而不同，所牽涉的層面相當複雜，利用線性迴歸方式似乎不能夠實際反應實際橋梁的狀況。進而發展出諸如類神經網路、機率可靠度等模式。

一般在每個決策點上都有兩種選擇，一種是依據現有的橋梁檢測以及歷史資料作出最後決策，進而對橋梁進行規劃維修；另一種為對橋梁進行詳細檢測，以進一步獲取橋梁維修計畫所需要的資訊，但如何選取決定橋梁維修檢測的成本和效益？一般橋梁檢測的效益乃依據設計條件(或回復標準)作出維修計畫相對於依據檢測後的資料作出的維修計畫的損失，但是在決定是否對橋梁進行檢查時能獲取什麼樣得資料是不可預知的。所以在決策分析框架下，資料的效益為依據設計條

件(或回復標準)作出的決策相對於依據檢測資料作出的決策的期望損失【46】。

本章節根據上述論調，將提出一最佳化維修建議成本分析模式，乃利用橋梁機率可靠度分析的方式，建立符合環境橋梁功能的機率劣化曲線，並利用此曲線，作最佳化功能成本分析。利用前章節所提供之流程評估出建議工法，再利用此分析，即可提供決策者最經濟的建議方案。

## 5.2 可靠度評估最佳化分析

最佳化決策是基於橋梁可靠度劣化模型，檢測維修的技術和費用模型之上的一種決策方法，其目的是確定在什麼時間對橋梁進行檢測維修，採用什麼樣的檢測和修補技術最為經濟。橋梁決策保證在橋梁設計使用年限內橋梁的可靠度不低於規定的功能指標值，維修決策依據橋梁承載力劣化模型和荷載模型；所以橋梁詳細檢測是為了進一步獲得橋梁承載力和荷載的資料，從而使得維修決策依據的資料越來越充分。

新建橋梁完成後，承載力會隨著時間逐漸退化，而橋梁所承受的某些荷載會逐步增加，最終橋梁在設計使用年限的可靠度會低於規範規定的目標可靠度，此時通常有兩種選擇，拆除此橋進行重建或對此橋梁進行維修使其可靠度恢復到指定標準值以上。Yanev B.S. (1998) 根據計算比較發現，後者遠遠比前者經濟合理。所以本章簡述的方法所面臨的第一個約束條件是，保證在使用期間內橋梁的可靠度不低於規定的標準值。

如果描述橋梁承載力退化、橋梁荷載，修理費用的隨機變量或者隨機過程的分布都是已知的，橋梁的可靠度劣化過程可以得到完全的概率描述，那麼只需要在上面的約束條件下對橋梁維修進行最佳化處

理即可。然而事實上橋梁的檢監測資料以目前來說不可能是完整的，例如對於新建橋梁這些資料的取得只能以其他已建橋梁統計得來。而各種隨機變量的分布在橋梁與橋梁之間的變數非常大，這就需要對所要研究的橋梁本身進行詳細調查，獲得承載力和荷載的相關資訊。應用  $\beta$  分支法將檢查得到的資訊利用串並聯系統模式綜合起來<sup>[47]</sup>，然而使得橋梁維修最佳化決策所依據的資料就會更貼近真實狀況。這些論點將在後節一一描述。

### 一、工程可靠度之定義

可靠度的意義(戴永九,1988)<sup>[48]</sup>，可靠度或稱為「機能品質」(functional quality control)，是延續品質管制的發展所產生的理論和計述，可靠度的定義是：『產品在預定時段(年限 age)或任務時間內(mission time)及環境壓力(stress level)下發揮其足夠績效(adequate performance)的條件機率』。其中所謂「任務」(mission)是指產品所被賦予的機能，或定義是『可靠度是指一系統、組件或裝於預期的操作條件下，在一定的壽命內執行其功能而不產生故障、失效的機率』。

近年來關於工程結構的可靠度研究發展迅速，許多與可靠度相關理論的國際會議也都定期的舉行，如「國際結構安全性與可靠度會議」(International Conference on Structural Safety and Reliability)、  
「國際土木工程中統計學與機率論的應用學術會議」(International Conference on Application of Statistics and Probability in Civil Engineering)。在國際上工程結構可靠度的論文，除了在國際會議的論文集合相關的工程和力學期刊發表外，1982年創刊的「結構安全性」(Structural Safety)更是專門刊載世界各國學者在這個領域的重要研究成果，以上種種都顯示了以可靠度方法分析工程結構當時使用性能與狀態，已逐漸成熟為多方所接受且應用廣泛。

應用在工程中，負荷(load)與強度(strength)之間的關係，對可靠度工程的重要性是不言而喻的。一般而言，當負荷超過強度時，就容易發生失效。由於負荷極強度均為隨機變數，因此負荷超出強度所引起的失效機率可由計算得出。圖 5.1 表示一個最簡單的狀況，及橋梁有一個定值強度，並且承受一個低於強度的固定負荷。在這種狀況下，橋梁不必擔心負荷過大的失效。圖 5.2 為一個較為典型的狀況，其中負荷與強度均為隨機變數，以平均數為中心而分布，由於兩部分沒有重疊的部分，因此也不必擔心負荷過大。然而圖 5.3 中，負荷與強度有重疊，在重疊部分，橋梁將因負荷超過強度而失效。這種狀況就是負荷與強度分布之間的干擾(interference)。事實上，強度並非永遠具有固定平均數值，例如當構件發生疲乏拉腐蝕現象時，強度分布將會隨著時間或反覆的負荷應用而變動。負荷-強度干擾在可靠度工程上市非常重要的考量，同時負荷與強度分布的方式也會影響失效的模態(mode)及失效率。

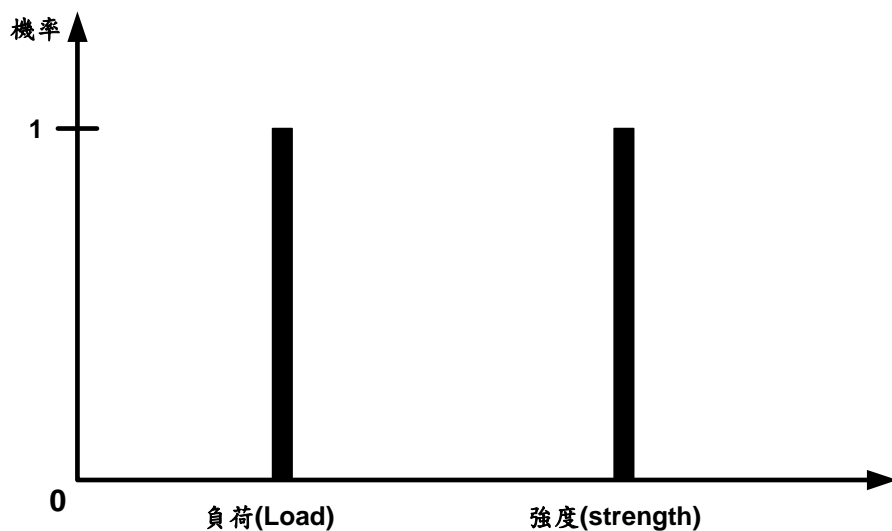


圖 5.1 離散型強度-負荷圖

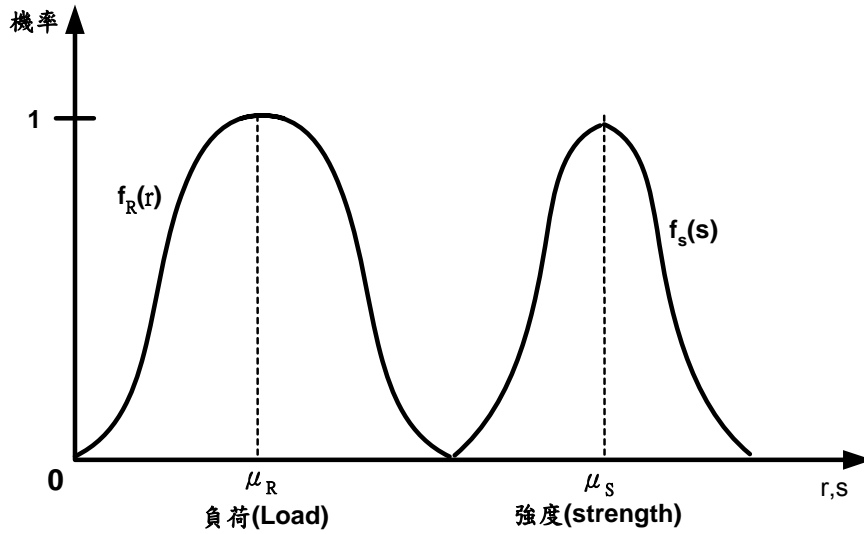


圖 5.2 分佈型強度-負荷圖

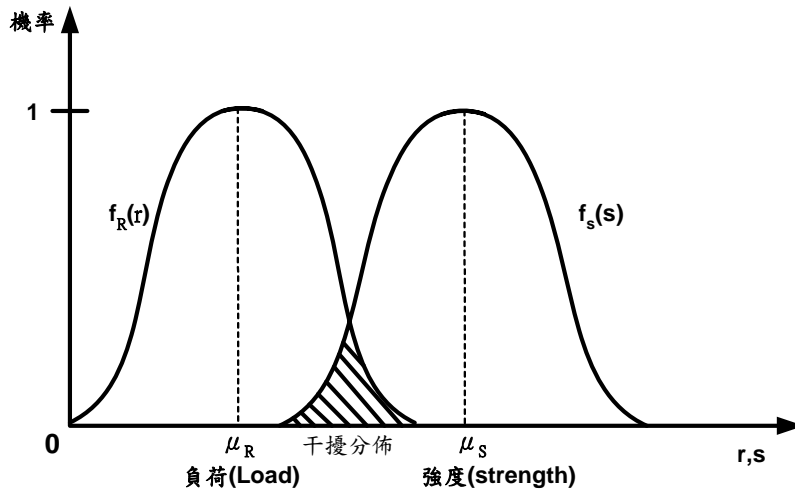


圖 5.3 干擾型強度-負荷圖

二、最佳化模式架構說明

本章節主要目的是要建立：(1)由橋梁構件劣化預測模式，建立橋梁系統劣化預測模式。(2)由橋梁劣化模式之機率密度函數，推求在維修優選上依之最佳化條件。因此本模式定義的相關參數，分述如下：

1.橋梁結構的可靠度與安全限度

國外進行橋梁構件劣化預測模式，根據大致上可分為三大類：一為早期廣為使用的馬可夫鏈方法，另外為近幾年來在國外發展極為迅速的可靠度分析方法，以及根據實驗模擬環境條件，以材料加速試驗分析之方法。馬可夫鏈之方法中，構件狀況與時間關係獨立為一重要假設條件，但因橋梁各構件材料會因所在環境、交通量等因素隨著時間而老劣化，有著與時間相當重要的相關性，馬可夫鏈此一假設顯然不符合橋梁構件隨時間變化的性能表現。

橋梁構件之狀況，值隨著時間的變化，但每年的狀況值是否為固定或是同時可能存在很多種狀況值，呈現在同一時間區段、類似的劣化環境裡，同樣的橋梁構件可能存在著不同的狀況值。內部材料因素、外在環境因素或是人為因素都在在說明了劣化狀況本身隱含了相當多的不確定性，此不確定性使得橋梁的同一構件的狀態值，可能同時以不同的性能狀態表現出來，各種狀況值皆有可能存在的機率，以機率的觀念表示同一時期相同橋梁構件的性能表現比僅以單一狀態值表示較為合理，因此本研究選擇導入可靠度的觀念配合統計分析與機率理論合理解釋橋梁構件劣化的狀態趨勢。

而結構可靠度與失效機率是結構可靠度理論中的兩個重要觀念，而結構可靠度的定義：「結構在特定時間和特定條件下，完成特定功能的機率。」，以  $P_r$  表示。而結構不能完成特定功能的機率，稱為失效機率，以  $P_f$  表示。 $P_r$  與  $P_f$  都能用來度量結構之可靠度，但一般慣用  $P_f$  度量。 $P_f$  大，可靠度低； $P_f$  小，可靠度高。而由圖 5.3 可知，當強度  $R$  與負荷  $S$  之分佈相互干擾時，會有重疊的干擾分佈值  $Z$  出現，通常定義為安全限度  $Z$ ，當  $Z < 0$  時，結構處於失效狀態；當  $Z > 0$  時，結構處於可靠狀態。因此  $Z < 0$  事件的機率就是結構的失效機率(Failure Probability)；而  $Z > 0$  事件的機率就是結構的可靠度。則

$$P_r = P[Z = R - S > 0]$$

$$P_f = P[Z = R - S < 0]$$

$$P_r + P_f = 1$$

如果 R 與 S 是連續隨機變量，其機率密度函數分別為  $f_R(r)$  和  $f_S(s)$ ，則可由負荷-強度干涉理論求解  $P_r$  和  $P_f$ 。

當 Z 事件機率密度函數定義為  $f_Z(z)$  時，則可由圖 5.4 表示。

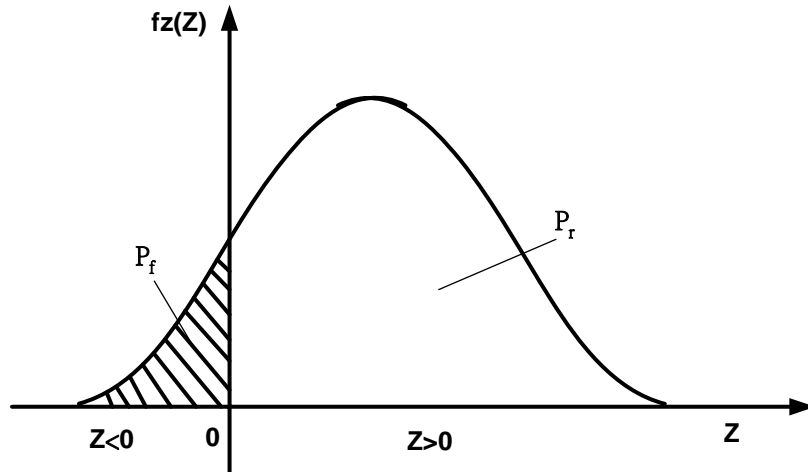


圖 5.4  $f_z(Z)$  機率密度曲線

而在橋梁在使用條件下所選定的功能指標，如 DER 檢測值、耐震、沖刷評估值，都代表著橋梁是在某種條件下或環境下所做的干擾值，也就是安全限度 Z，所表現出來的為安全限度機率密度函數。而一般工程界所認定這些干擾值 Z，在時間序列裡其樣本資料均符合對數常態分佈(Lognormal distribution)。其對數機率密度函數如下：

$$y = f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

其中  $\sigma$  = 樣本空間中之標準差

$\mu$  = 樣本數之平均值

則

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f(0)dx \quad P_r = 1 - P_f$$

## 2. 結構可靠度指標 $\beta$ 的定義與其物理意義

用失效機率  $P_f$  度量結構的可靠度具有其明顯的物理意義，但計算  $P_f$  時要多維積分，比較困難。如以二維的情形說明，當  $f_R(r)$ 、 $f_S(s)$  和  $f_{RS}(r,s)$  比較複雜時，一般難以利用上述干涉公式進行積分運算，因而現定的國際標準以及一些國家都使用可靠度指標  $\beta$  來代替  $P_f$  度量結構可靠度。

先以常態分佈說明，若  $R$  與  $S$  分別服從常態分佈  $N(\mu_R, \sigma_R^2)$  和  $N(\mu_S, \sigma_S^2)$ ，故  $Z=R-S$  服從  $N(\mu_Z, \sigma_Z^2)$ 。其中， $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$ ， $\sigma_Z = (\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}$ 。因此， $(Z - \mu_Z) / \sigma_Z$  服從標準常態分佈  $N(0,1)$ ，故可寫為

$$P_f = F_Z(0) = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right)$$

$$P_r = 1 - P_f = \Phi\left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi\left(\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right)$$

上式中比值  $\mu_Z / \sigma_Z$  撐為可靠度指標，以  $\beta$  表示，即

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}$$

由於安全限度  $Z$  的平均值  $\mu_Z$ ，標準差  $\sigma_Z$ ，根據  $\mu_Z = \beta \times \sigma_Z$ ，可得到平均值距離座標原點的距離為  $\beta \sigma_Z$ 。也就是  $Z$  的機率密度函數曲線落在原點左邊陰影部份，即  $Z < 0$  的機率為  $P_f$  值。由圖 5.5 所示， $\beta$  增大， $Z$  的機率密度曲線右移，則  $P_f$  減小； $\beta$  減小， $Z$  的機率密度曲線左移，則  $P_f$  增大。只要  $Z$  的機率密度函數固定， $\beta$  和  $P_f$  的關係就可確定。



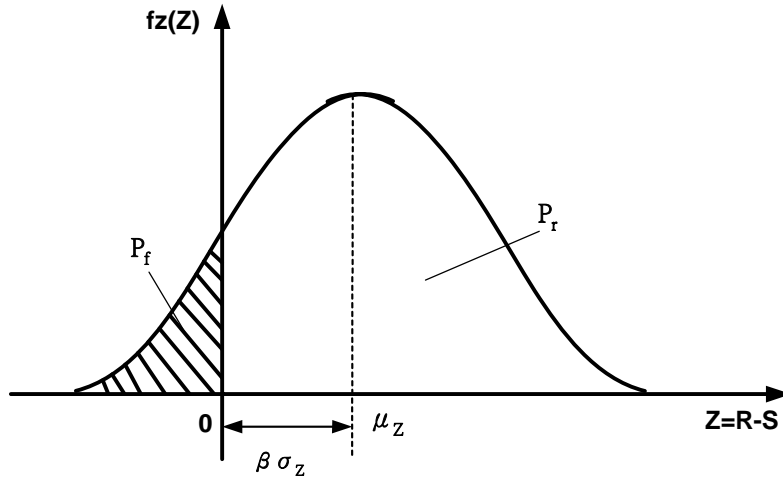


圖 5.5  $\beta$  和  $P_f$  的關係

由定義可知， $\beta$  是反應  $f_R(r)$ 、 $f_S(s)$  的相對位置 ( $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$ ) 和離散程度 ( $Z = (\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}$ ) 的一個量值。因而它更能全面地反應出影響結構可靠度各種主要因素的變異性。至於  $\beta$  與  $\mu_Z$  和  $\sigma_Z$  的關聯性。當  $Z$  的均值  $\mu_Z$  增加或標準差  $\sigma_Z$  減小時，均使得  $\beta$  值增加， $P_f$  值降低。也就是說，結構性能均值得加大、荷載效應的均值減小、結構性能與荷載效應變異性的減小均可使結構可靠度增加，使結構失效概率減小。

而在對數常態分佈下的可靠度指標公式為

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\mu_{\ln R} - \mu_{\ln S}}{\sqrt{\sigma_{\ln R}^2 + \sigma_{\ln S}^2}} = \frac{[\ln \mu_R - \ln(1 + CV_R^2)^{1/2}] - [\ln \mu_S - \ln(1 + CV_S^2)^{1/2}]}{\sqrt{\ln(1 + CV_R^2) + \ln(1 + CV_S^2)}} \\ &= \frac{\ln\left[\frac{\mu_R}{\mu_S} \left(\frac{1 + CV_S^2}{1 + CV_R^2}\right)^{1/2}\right]}{\sqrt{\ln(1 + CV_R^2) + \ln(1 + CV_S^2)}} \end{aligned}$$

所以當在某特定條件下所取得的橋梁歷年功能性指標值(如 DER 值、耐震分數值等)，分別計算當年的可靠度指標，透過迴歸分析，即可建立橋梁構件在此特定條件下的可靠度指標迴歸方程式，藉由迴歸方程式所代表的趨勢即為橋梁構件在某功能指標下之劣化趨勢，同時當有了歷史資料的各年平均值與標準差，即可觀察橋梁構件隨著橋齡

增加所表現出來的變化情形。其可靠度迴歸趨勢方程式示意圖如圖 5.6 所示。藉由迴歸方程式預測橋梁構件劣化預測之功能狀況值。

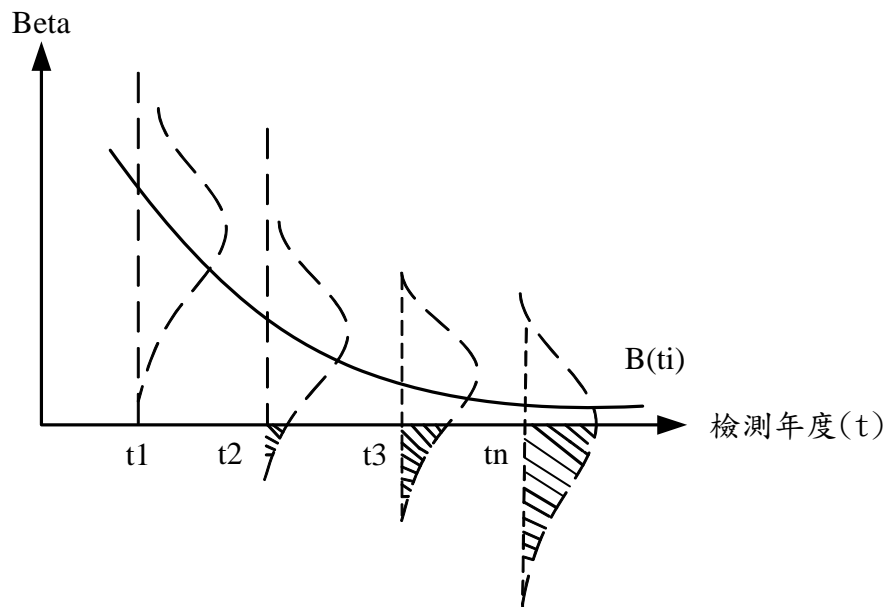


圖 5.6 橋梁迴歸趨勢方程式示意圖

### 3. 橋梁結構系統的串並聯模式

由於橋梁結構系統由各種構件所構成，在台灣地區橋梁管理系統 (TBMS) 裡就定義了 20 個構件，在上述的理論可以單獨計算出橋梁每一個構件的劣化曲線模式，但如何將各個構件的劣化曲線「組合」成一代表橋梁整體的劣化模式。本研究將引用一橋梁結構系通的串並聯模式(王有志等, 2002)<sup>[47]</sup> 來解決這問題。其主要的精神如下：

#### (1) 把複雜的結構系統模型化為容易進行可靠度分析的基本結構系統

假設每一個結構系統的所有構件都隨機獨立，當其中任一構件失效時都會導致結構系統失效，則該系統就可以模型化為串聯結構系統。若一個結構系統只有在所有構件(或子系統)都失效時，系統才會失效，則可成為並聯結構系統。至於更複雜之結構系統(如橋梁)，可模型化為串-並聯結構系統。

## (2) 用主要失效模式預測結構系統的可靠度

橋梁的結構系統可靠度，可以利用某種失效模式下可能產生的失效形式預測。但對橋梁來說，可能產生的失效形式非常多，但想所有的失效形式全都考量在可靠度裡，是不可能也不符合經濟效益的。所以在做分析時，只需挑選橋梁重要構件中常劣化的模式即可。

串聯、並聯、串並聯結構系統的可靠度分析簡述如下：

### (1) 串聯結構系統

如上所說，如果一個結構系統的所有構件(或子系統)都相互關聯，當其中某一構件(或子系統)失效時會導致整個結構系統失效，這種結構系統稱為串聯結構系統。如圖 5.7 所示。

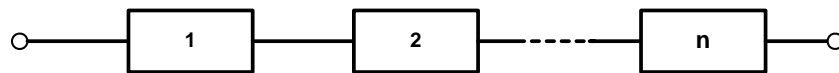


圖 5.7 串聯系統示意圖

假設由  $n$  個構件組成的串聯系統，則構件的安全限度為

$$Z_i = R_i - S_i$$

則構件  $i$  的失效機率為

$$P_{fi} = P(Z_i = R_i - S_i \leq 0)$$

由於串聯系統，對於不論哪一構件失效，都會引起整個結構系統失效所以結構系統失效的事件  $F$  可用下式定義：

$$F = F_1 \cup F_2 \cup F_3 \cdots \cup F_n = \bigcup_{i=1}^n F_i$$

進而串聯結構系統的機率  $P_f$  和可靠度  $P_r$  可用下式顯示：

$$P_f = P(F) = P\left(\bigcup_{i=1}^n F_i\right)$$

$$P_r = P(\bar{F}) = P\left(\bigcap_{i=1}^n \bar{F}_i\right)$$

## (2) 並聯結構系統

並聯結構系統為當  $n$  個構件組成時，只要有一個構件完好無損，整個系統就能繼續工作；也就是說，如果一個結構系統當所有的構件(或子系統)都失效時系統才會失效，如圖 5.8 所示。

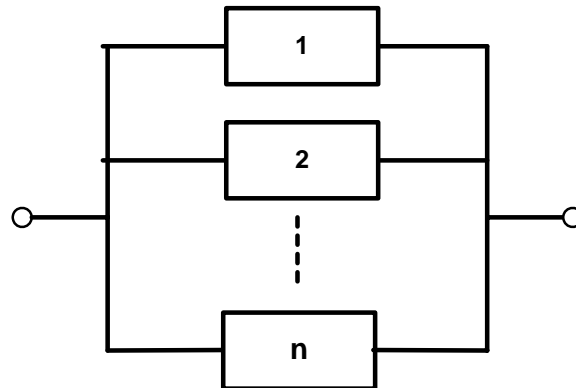


圖 5.8 並聯系統示意圖

假設由  $n$  個構件組成的並聯系統，設構件  $j$  的失效事件為  $F_j$ ，則系統失效的事件  $F$  可由下式定義：

$$F = F_1 \cap F_2 \cap F_3 \cdots \cap F_n = \bigcap_{j=1}^n F_j$$

則並聯系統的失效機率  $P_f$  和可靠度  $P_r$ ，可用下式計算：

$$P_f = P(F) = P\left(\bigcap_{j=1}^n F_j\right)$$

$$P_r = P(\bar{F}) = P\left(\bigcup_{j=1}^n \bar{F}_j\right)$$

當每個構件的可靠度  $P_{rj}$  已知時，則

$$P_r = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P_{rj})$$

## (3) 串-並聯結構系統

串聯-並聯組合系統型是大致由下列幾種：

a. 串聯-並聯系統：此系統由構件並聯組成的子系統加以串聯，組成複合系統，如圖 5.9 所示。

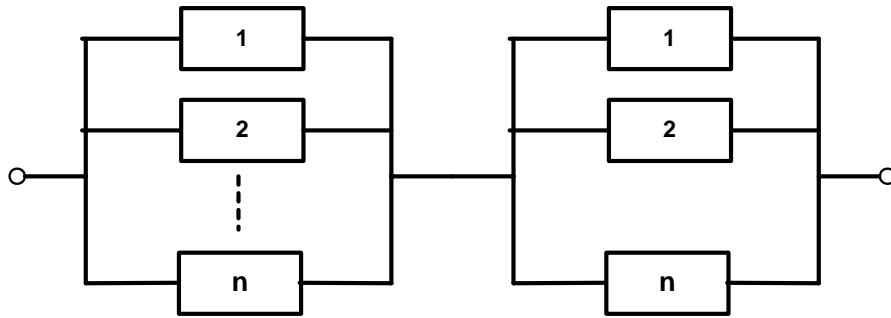


圖 5.9 串-並聯系統示意圖

若有 n 個串聯子系統，每一個子系統有 m 個並聯構件之系統可靠度為

$$P_r = [1 - (1 - P_{ri})^n]^m$$

b. 並聯-串聯系統：此系統由構件串聯組成的子系統加以並聯，組成複合系統，如圖 5.10 所示。

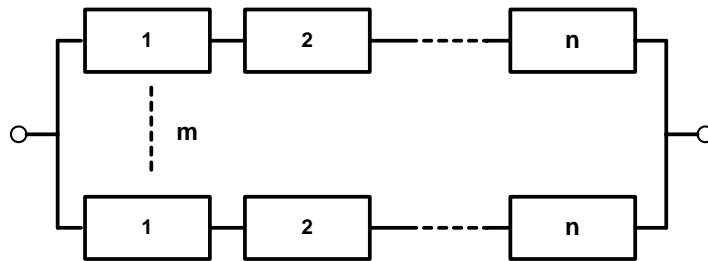


圖 5.10 並-串聯系統示意圖

若有 n 個構件、m 個平行通路，每一個構件的可靠度為  $P_{ri}$  系統可靠度為

$$P_r = 1 - (1 - P_{ri}^n)^m$$

c. 混合系統：上述兩種組合，如圖 5.11 所示。

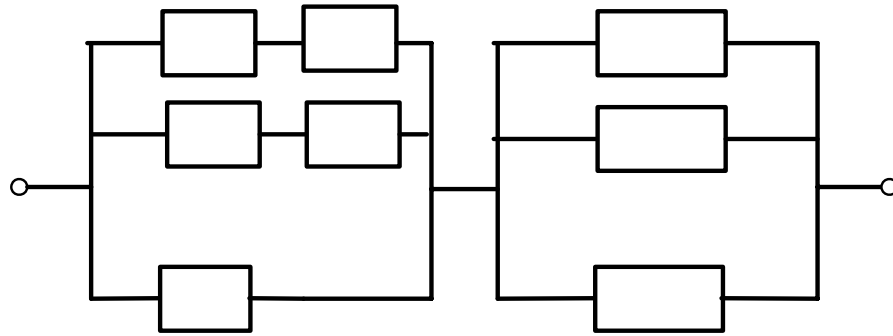


圖 5.11 並-串聯混合系統示意圖

### 5.3 計算流程與步驟

本研究考量目前國內橋梁管理現況，須對模式作部分基本假設與條件設定，以下說明假設及條件之依據：

#### 1. 建立功能指標

以往之模式藉由專家經驗之預測決定橋梁劣化趨勢，於進行生命週期成本計算時，常因較主觀性而真實性不明，為改善此缺點，本研究以第四章橋梁延壽評估策略中，結合DER檢測資料、地震、沖刷評估分數、耐久性評估分數以及服務性功能分數所共同制定的整體橋梁狀況綜合指標，兼具功能性與服務性，各方考量橋梁整體狀況與經濟性的指標。

#### 2. 使用者對『失效』之定義

可靠度相當重要的一個步驟，就是定義失效(failure)，當橋梁構件落入結構性或服務性不能滿足使用者的需求的狀態值時，即定義為該構件失效，失效的狀態由使用者依據所能容忍橋梁構件性能表現的限度進行設定的門檻值。

#### 3. 使用者最低可接受之可靠度

當橋梁構件落入失效的狀態機率大於一定百分比時，表示該構件有很大的機率落入失效，該構件所能符合使用者性能要求的可靠度就

相對的低，也就是信心水準不高，使用者依據他所能容忍的落入失效預最低可接受的信心水準進行設定，當構件可靠度指標劣化至該設定標準時，表示使用者對該構件已失去信心，該年度便是維修進行之時間點，藉此標準之設定，即可決定構件之維修時間點。

#### 一、基本假設：

1. 界定分析橋群特性與自然區域(如地震、沖刷、耐久性、距海遠近)
2. 定義分析橋群所使用的參數(如 PI 值、評估表格分數、DERU 值)，此參數需不被擾動過(如遇維修點後的分數，視為此資料為擾動過)。
3. 假設每一年度橋梁特性樣本資料為「對數常態分佈」。
4. 每一年度樣本資料數需大於 30 筆( $N(X_i) \geq 30$ )。

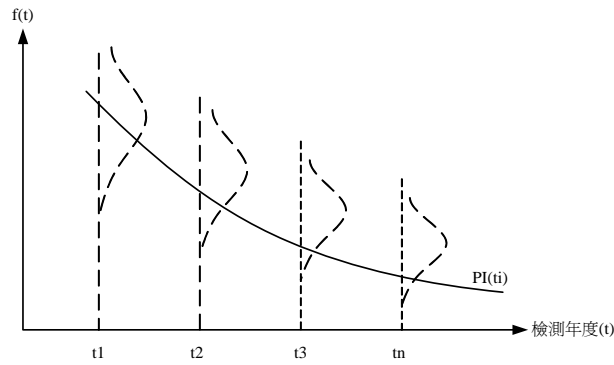
#### 二、分析步驟：

1. 定義分析橋群特性參數。(如:耐震評估分數，0~100 分)
2. 利用此特性參數之各項考量因子(如設計年度、橋梁結構形式等做區分)，篩選分析橋群範圍。
3. 將每一年度檢測資料分佈，視為對數常態分佈，求出每一年度之平均值  $\mu_i$  與標準差  $\sigma_i$ 。

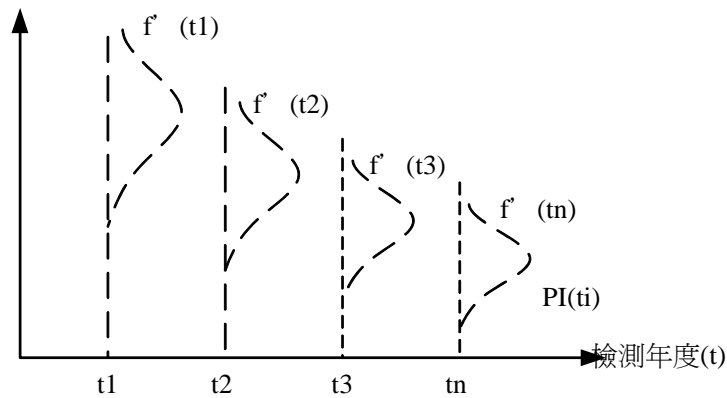
$$\text{對數常態分佈機率密度函數 } f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(\ln x - \mu)^2}{\sigma^2}\right]$$

$$\mu = \mu_{\ln x} = \ln \frac{\mu_x}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2}}}$$

$$\sigma = \sigma_{\ln x} = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2}\right)}$$

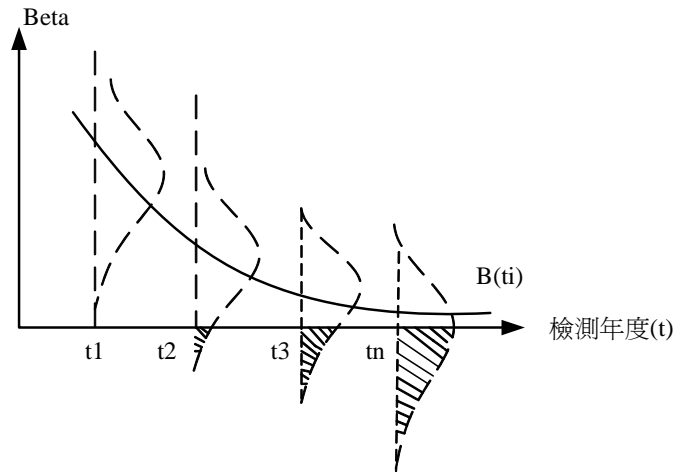


4. 再將歷年對數常態分佈機率密度函數值  $f(t_i)$ ，利用指數迴歸得出一新迴歸曲線  $PI(t_i) = ae^{-bx}$ 。
5. 則視每一年度(如:  $t_1$ 、 $t_2$ )檢測資料在對數常態分佈下其機率密度函數平均值(中值)為  $PI(t_i)$ 。
6. 因為已知每一年度之平均值  $\mu_i$  與標準差  $\sigma_i$ ，再反算(inverse)得出所代表之實際值(如:  $PI=80$ )，並重新求得每一年之對數常態分佈機率密度函數  $f'(x)$ 。



7. 計算可靠度指標  $\beta = \frac{\mu}{\sigma}$ ，並計算每一年度可靠度迴歸趨勢方程式。





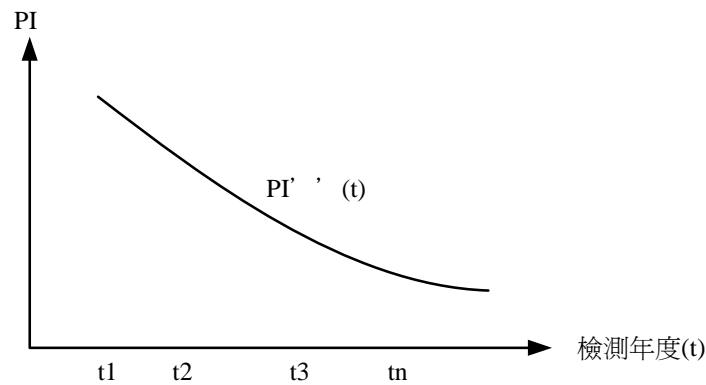
8.指數迴歸歷年檢測迴歸方程式  $PI'(t_i)$ (其值為機率密度函數值)。

9.定義維修門檻值  $M$ (如: $PI=60$ )，此  $M$  值以下視為需要維修時之失敗機率  $P_f$ 。

10.再此  $M$  值之下，則可求出每一年度之失敗機率  $P_f$  與成功機率  $P_r$ 。

11.利用  $PI'(t_i)$ ，反算得出所代表之  $PI$  值。

12.最終得出此橋群歷年劣化曲線  $PI''(t_i)$ 。



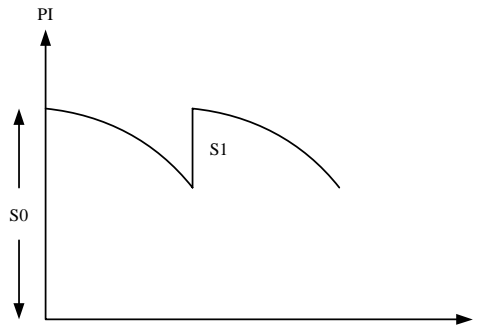
定義某一年度  $t_i$  之最佳化維修成本

$$C_{m,t_i} = P_f \cdot e \cdot C_{ini} + P_f \cdot (1-e) \cdot C_m + P_r \cdot e \cdot C_m + P_r \cdot (1-e) \cdot C_{ini}$$

$C_{ini}$ ：新建成本

$$C_m：維修成本 C_m = \left( \frac{s_1}{s_0} \right)^\alpha \cdot C_{ini}$$

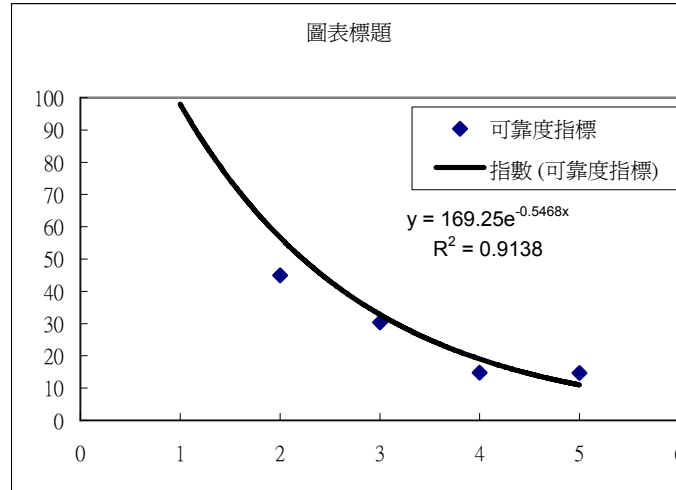
$e$ ：人為誤差



此一成本包含四個項目：第一項代表著橋梁從新建到某一年在常態維修下之失效機率  $P_f$  和在當年人為目視檢測下所填錯或因經驗不足所犯的誤差  $e$  以及新建成本  $C_{ini}$  之綜合效應；第二項代表著橋梁從新建到某一年在常態維修下之失效機率  $P_f$  和在當年沒有人為誤差的機率以及維修成本  $C_m$  之綜合效應，其中維修成本乃假設回復水準  $S_1$  與初始狀況指標值  $S_0$  之比例乘上初始成本的值， $\alpha$  為使用者自行定義，通常設為 1；第三項代表著橋梁從新建到某一年在常態維修下之成功可靠度機率  $P_r$  和在當年人為目視檢測下所填錯或因經驗不足所犯的誤差  $e$  以及維修成本  $C_m$  之綜合效應；第四項代表著橋梁從新建到某一年在常態維修下之成功可靠度機率  $P_r$  和在當年沒有人為誤差的機率以及新建成本  $C_{ini}$  之綜合效應。

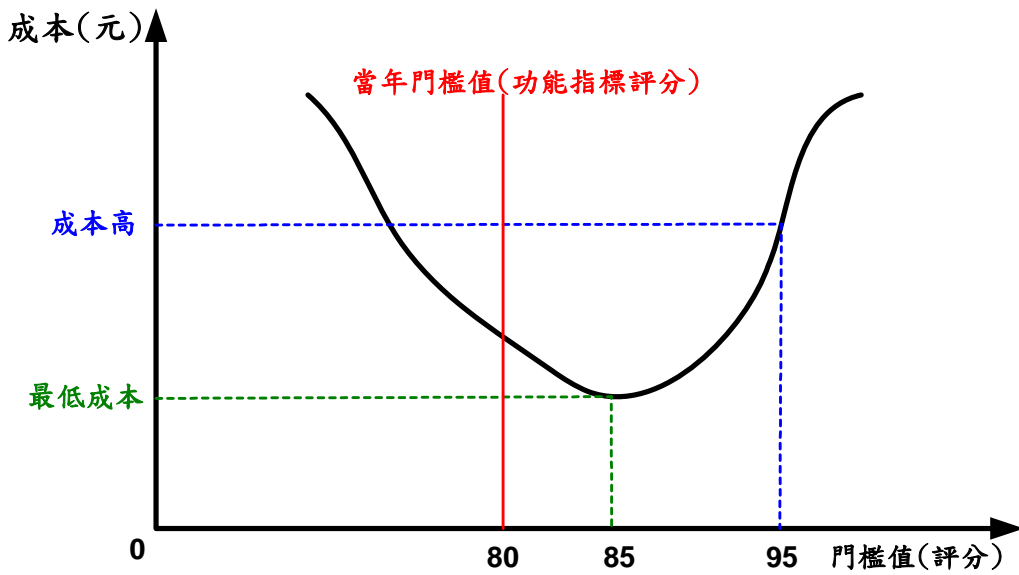
$P_f$  值高自然代表著橋梁在當年受損的機率較高；而  $P_r$  高代表著橋梁在當年況的可靠度較高。當其一開始所定義的參數為維修門檻值，在對應到此成本下，就是維修門檻-維修成本之最佳化模式；如果定義的參數為檢測的時程，對應到此成本下，就是最佳化之檢測時間模式。換句話說，只要使用者根據需求，定義參數之特性，即可做出任何最佳化的模式。(如維修工法最佳化、檢測時程最佳化...等等)

13. 推求下一年度維修所需成本，與建立劣化曲線。



示意圖

14. 而根據當年設定不同的門檻值，對應不同之失效機率和成本，即可推出使用者在維修時之最佳化建議，如下圖所示。



示意圖

### 5.4 例題說明

鑒於上述模式之假設，橋梁之歷史資料實無不足，或在當年資料筆數並不詳盡，為詳細敘述此模式之便利性與可行性，本研究乃根據合理的假設數據來進行計算，目的是由示範案例讓初學者了解此模式

的應用，待往後橋梁資料收集完整後，更可驗證此模式的功能與真實性。

### 1. 假設橋梁基本資料

本研究逕自行假設台灣某一地區橋群自然環境特性，如下表：

**表 5.1 假設橋群自然劣化因子篩選**

分析橋群自然環境因子	
建造年代	民國 89 年之後
位置	台灣北部
路線	國道一號
氣候區域	北部區域
震區	地震乙區
流域	淡水河流域
海岸距離	1~5KM(重鹽害區)

在分析橋梁之前必須先對某一區域橋梁先對自然特性分析，將有一此特性之橋梁通過篩選後進行分析。其中為了表現出此一區域橋梁在新建不久，即因所處重鹽害區，導致分析橋梁在新建後構件耐久性完全不足，而至劣化嚴重。

### 2. 建立橋梁綜合性指標分數

此案例自行假設預分析橋梁均落於表 5.1 中所示區域，並選取此橋群在新建後一年開始紀錄檢測資料並做成橋梁綜合性指標分數，共計五年資料。且橋梁快速劣化導致第五年分數嚴重下降。其橋群每年記錄 30 多筆資料，如下表 5.2 所示。

表 5.2 分析橋群綜合性指標分數資料筆數

第一年綜合性指標分數									
評分	100~90	90~80	80~70	70~60	60~50	50~40	40~30	30~20	20~10
資料數	28	2	0	0	0	0	0	0	0
第二年綜合性指標分數									
評分	100~90	90~80	80~70	70~60	60~50	50~40	40~30	30~20	20~10
資料數	14	14	1	0	1	0	0	0	0
第三年綜合性指標分數									
評分	100~90	90~80	80~70	70~60	60~50	50~40	40~30	30~20	20~10
資料數	12	3	14	3	0	0	0	0	0
第四年綜合性指標分數									
評分	100~90	90~80	80~70	70~60	60~50	50~40	40~30	30~20	20~10
資料數	0	1	4	9	8	6	1	1	0
第五年綜合性指標分數									
評分	100~90	90~80	80~70	70~60	60~50	50~40	40~30	30~20	20~10
資料數	0	1	5	8	4	9	3	0	0
總計	54	21	24	20	13	15	4	1	0

3. 建立每年資料之對數常態分佈。

將每一年之資料筆數，視為對數常態分佈，並建立個別標準差  $\sigma_i$  與平均值  $\mu_i$ 。所求得之標準差與平均值如下表 5.3 所示。

$$\text{對數常態分佈機率密度函數 } f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(\ln x - \mu)^2}{\sigma^2}\right]$$

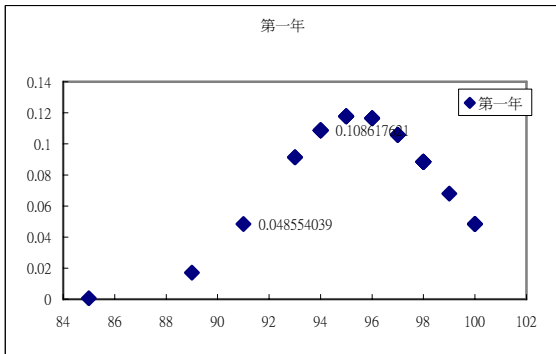
$$\mu = \mu_{\ln x} = \ln \frac{\mu_x}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2}}}$$

$$\sigma = \sigma_{\ln x} = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2}\right)}$$

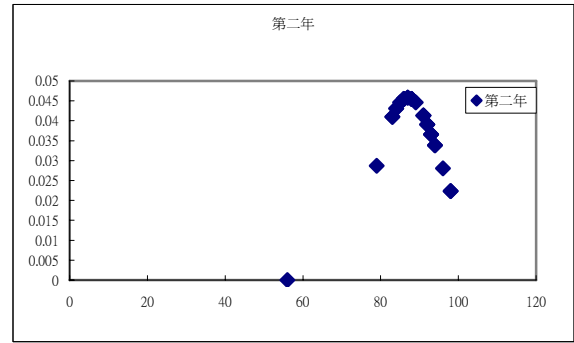
表 5.3 分析橋群歷年參數計算

檢測年期	1	2	3	4	5
平均值	4.559	4.476	4.401	4.032	3.994
標準差	0.035	0.099	0.145	0.273	0.273
可靠度指標	2.112	1.205	0.874	0.646	0.579

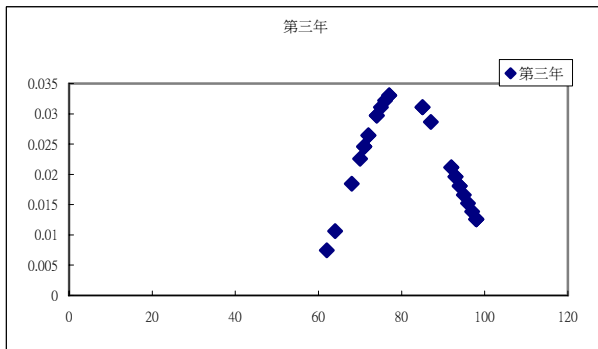
而歷年下之對數常態分佈密度曲線圖如圖 5.12(a)~(e)所示。



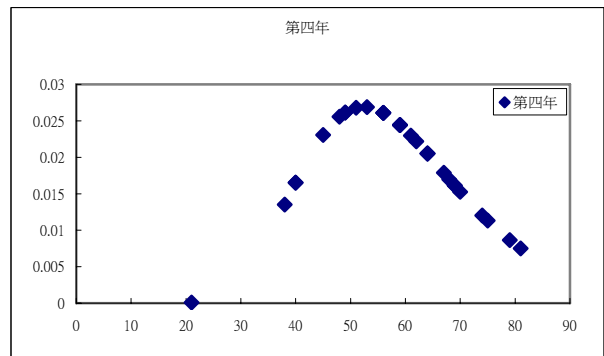
(a) 第一年資料分佈



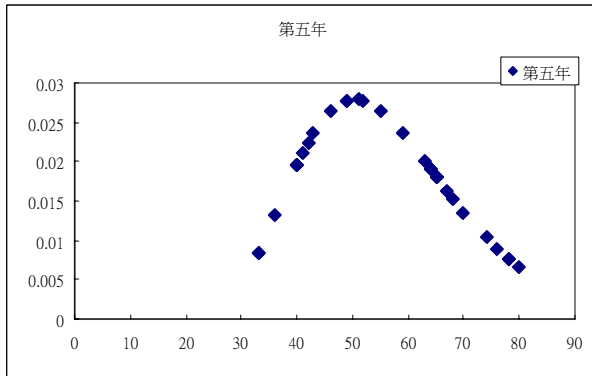
(b) 第二年資料分佈



(c) 第三年資料分佈



(d) 第四年資料分佈



(e) 第五年資料分佈

圖 5.12 分析橋群歷年對數常態分布密度曲線

#### 4. 歷年函數值迴歸

再將歷年對數常態分佈機率密度函數值  $f(t_i)$ ，利用指數迴歸得出一新迴歸曲線  $PI(t_i) = ae^{-bx}$ 。所得圖形如圖 5.13 所示。所得函數為

$$f(t_i) = 0.0742e^{-0.3525t}$$

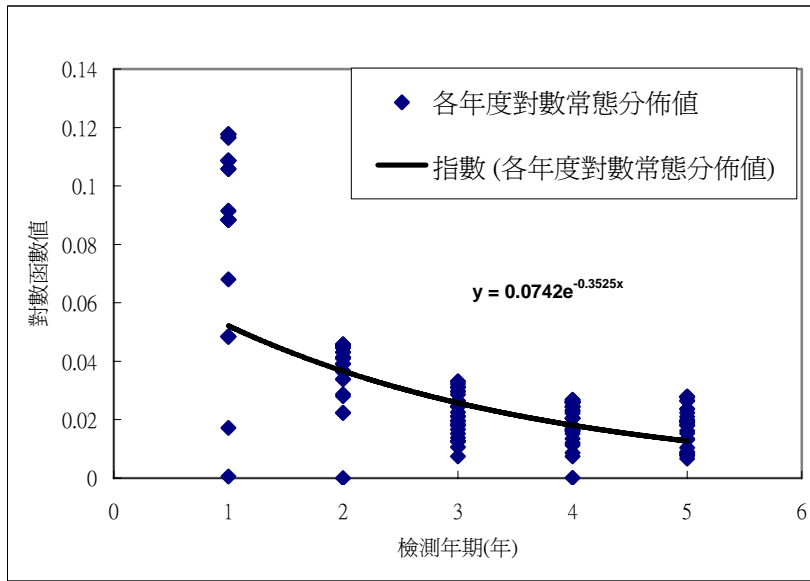


圖 5.13 歷年對數函數值迴歸曲線

5.則視每一年度(如: $t_1$ 、 $t_2$ )檢測資料在對數常態分佈下其機率密度函數平均值(中值)為  $F(t_i)$ 。

6.修正歷年對數常態分佈

將已知每一年度之平均值  $F(t_i)$ 與標準差  $\sigma_i$ ，再反算(inverse)得出所代表之實際值(如:PI=80)，並重新求得每一年之對數常態分佈機率密度函數  $F'(t_i)$ 。如下圖 5.14 所示意。

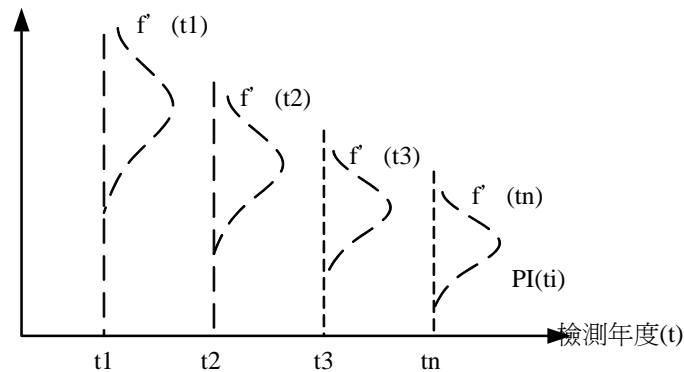


圖 5.14 修正後歷年對數常態分佈示意圖

7.計算可靠度迴歸曲線

計算可靠度指標  $\beta = \frac{\mu}{\sigma}$ ，並計算每一年度可靠度迴歸趨勢方程式。

如圖 5.15 所示迴歸方程式為

$$y = 2.5264e^{-0.3211x}$$

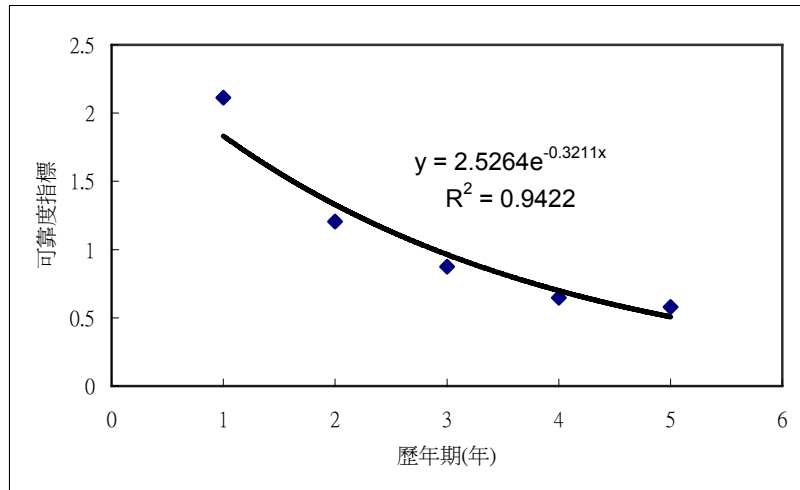


圖 5.15 歷年可靠度指標方程式

#### 8.指數迴歸歷年檢測迴歸方程式 $PI'(t_i)$ 。

因為由步驟 6 所得出之迴歸曲線之函數值為對數常態分佈值，不是實際所評分出來之值，為增加可讀性，可將已知每一年度之平均值  $F(t_i)$  與標準差  $\sigma_i$ ，再反算(inverse)得出所代表之實際值(如:PI=80)，並重新迴歸求得每一年之綜合性指標評分值函數  $PI'(t_i)$ 。如下圖 5.14 所示。其迴歸方程為

$$PI'(t_i) = 129.21e^{-0.2557t_i}$$



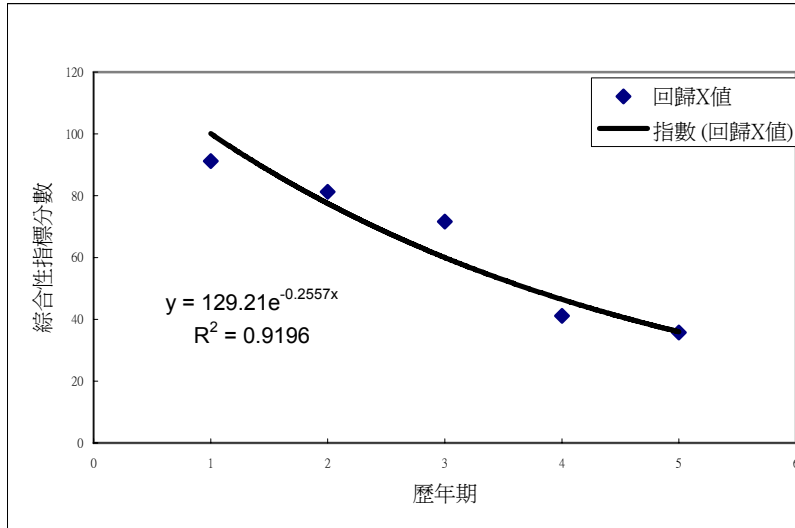


圖 5.16 迴歸橋梁綜合性指標分數方程式

9. 計算失效機率。

定義維修門檻值 M(如:PI=60)，此 M 值以下視為需要維修時之失敗機率 Pf。圖 5.17 顯示在不同門檻值下之失效機率圖。

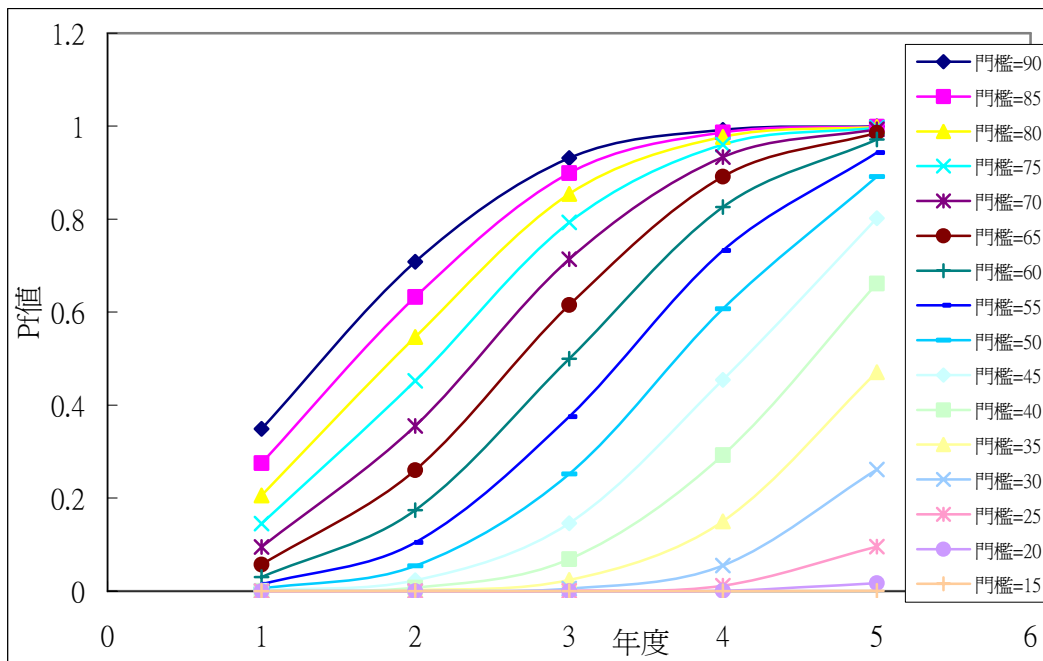


圖 5.17 分析橋群歷年下不同門檻值之失效機率

由圖中可知：

在把歷年的 Pf 做出來後，發現均散佈在全部圖形中(表示所有情形均納入考量，符合常態分佈概念)；且每一年度如維修之門檻值愈高，其失效機率就愈大，在第五年(劣化嚴重時)，即使維修門檻值要再提高，其回覆的機率(可靠度機率)也不大了。代表著如果橋梁在劣化嚴重的情形下要回復以往的水準，其機率已經不大；到時再修時所維護的成本一定提高，也不符合經濟效益。

10.再特定 M 值之下，則可求出每一年度之失敗機率 Pf 與成功機率 Pr。

11.利用 PI'(ti)，反算得出所代表之 PI 值。

12.計算最佳化維修成本

由步驟 8 最終得出此橋群歷年劣化曲線 PI'(ti)。再定義最佳化維修成本，其某一年度 ti 之最佳化維修成本

$$C_{m,ti} = P_f \cdot e \cdot C_{ini} + P_f \cdot (1-e) \cdot C_m + P_r \cdot e \cdot C_m + P_r \cdot (1-e) \cdot C_{ini}$$

$C_{ini}$ ：新建成本

$$C_m：\text{維修成本 } C_m = \left( \frac{S_1}{S_0} \right)^\alpha \cdot C_{ini}$$

e：人為誤差

此一成本包含四個項目：第一項代表著橋梁從新建到某一年在常態維修下之失效機率 Pf 和在當年人為目視檢測下所填錯或因經驗不足所犯的誤差 e 以及新建成本 Cini 之綜合效應；第二項代表著橋梁從新建到某一年在常態維修下之失效機率 Pf 和在當年沒有人為誤差的機率以及維修成本 Cm 之綜合效應；其中維修成本乃假設回復水準 S1 與初始狀況指標值 S0 之比例乘上初始成本的值，α 為使用者自行定義，通常設為 1；第三項代表著橋梁從新建到某一年在常態維修下之成功可靠度機率 Pr 和在當年人為目視檢測下所填錯或因經驗不足所犯的誤差 e 以及維修成本 Cm 之綜合效應；第四項代表著橋梁從新建到某一年在

常態維修下之成功可靠度機率  $P_r$  和在當年沒有人為誤差的機率以及新建成本  $C_{ini}$  之綜合效應。

圖 5.18 顯示，當初始成本訂為 1 時，在新建後檢測第三、四、五年進入維修時，不同門檻值所需花費的成本之最佳化模式。由圖中可看出當進入維修時間愈早時(如第三年)，其最佳化(成本最低)之維修回復水準可在 80 分；當隨著年期愈久遠，其要回復分數所需的成本就愈高。決策者可以根據不同的回復標準(門檻值)以及預算，作出最佳化之判斷。

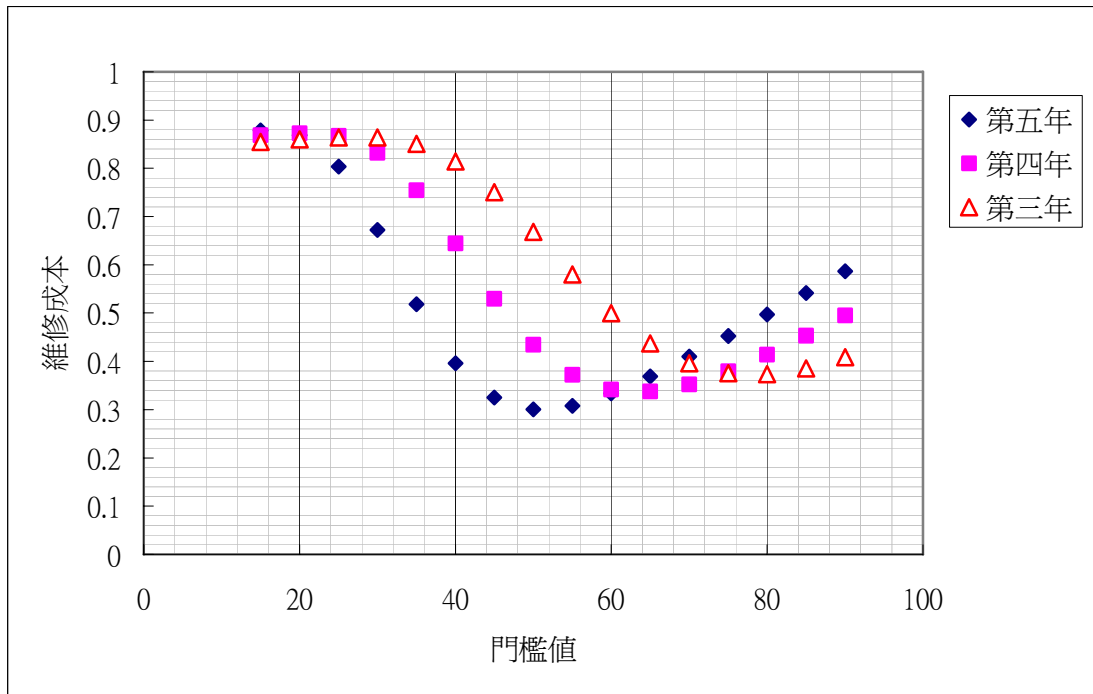


圖 5.18 分析橋梁在第三、四、五年之最佳化維修成本

### 13. 建立生命週期曲線

由上圖 5.18 可看出在第三年最佳維修門檻為 80 分，且當年根據劣化曲線得知破壞門檻為 70 分，本研究將利用門檻=70、80、90 作一最佳化的論證。

如推求下一年度維修所需成本，與建立生命週期劣化曲線。如圖 5.19 所示(當年評分值為 70 分，表示達到破壞階段)。並比較如預期(預防式維修)最佳維修門檻=80 以及提高預期門檻=90，與選擇當年門檻值=70 時其生命週期曲線。發現在如只遇到破壞時門檻 70 的水準下其橋梁使用年限較長。如圖 5.19。

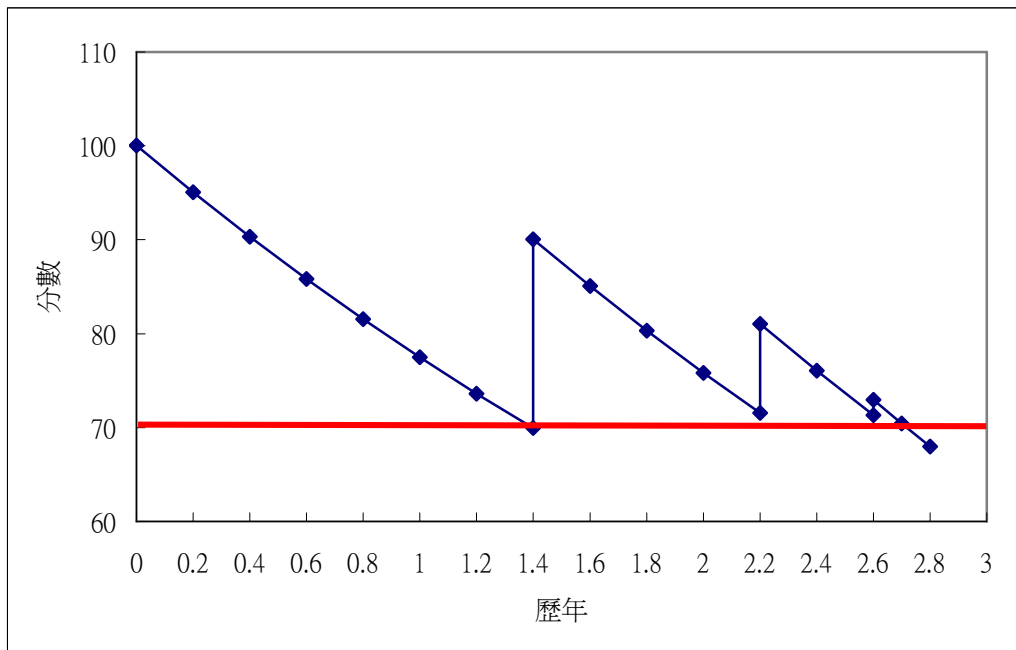


圖 5.19 門檻值=70 生命週期曲線

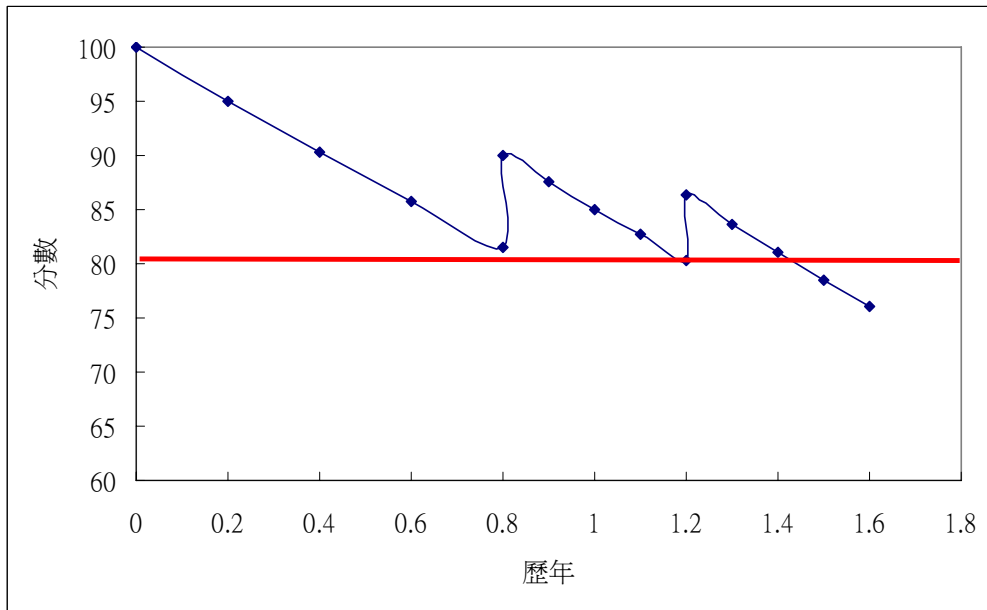


圖 5.20 門檻值=80 時之生命週期曲線

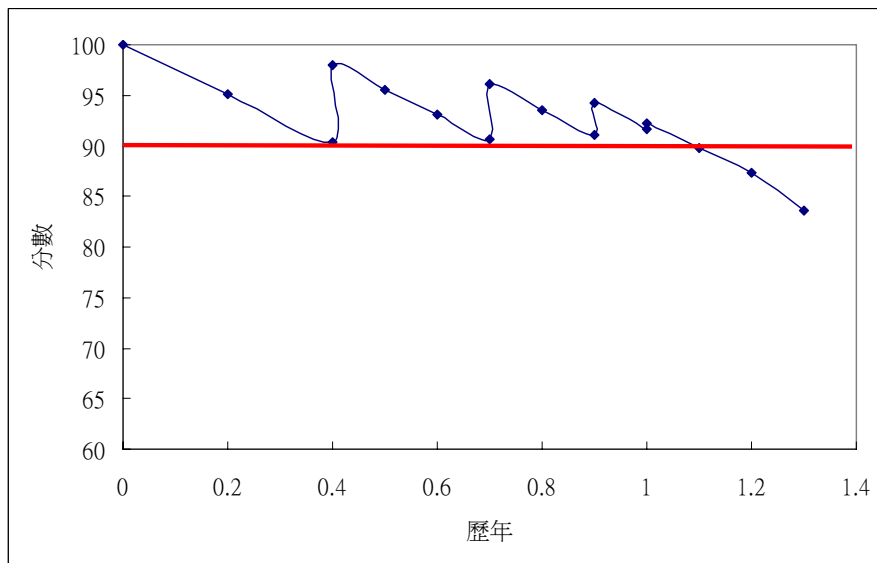


圖 5.21 門檻值=90 時之生命週期曲線

歷年累積成本如下圖所示。

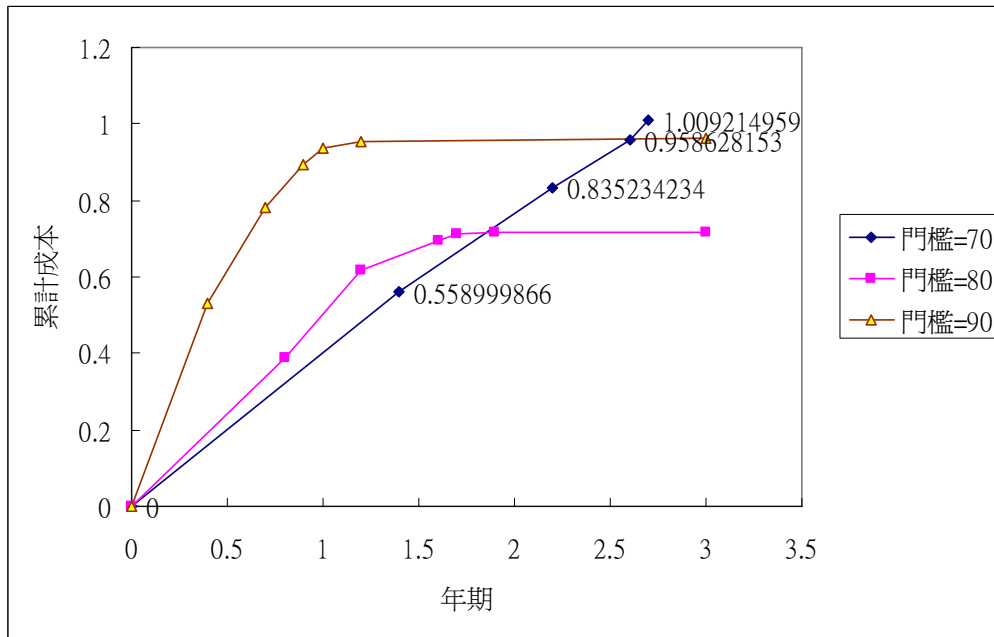


圖 5.22 分析橋梁界定不同門檻時歷年累積成本

由上圖可看出，雖然在當年達到本來就應該維修門檻值=70 時，剛開始所花費成本較低，但 1.7 年之後所需費用成本卻急速上昇；且如使用者想利用預防式觀念提高門檻=90 時，其所花費的成本一開始就很高，但不是最佳之經濟成本；反而最佳化門檻=80 時，雖開始花費較高，但在橋梁整個生命週期下，之後花費的成本卻趨於平緩且最低。代表著當維修門檻訂為 80 時，是為最佳之維修成本。

1.由上述結果，可知當橋梁在進行維修時，如一開始選擇門檻值=70 時，雖然從生命週期曲線中可得出在經不斷的反應式維修下，似乎可以比門檻值=80(提前維修)就維修時，所使用的橋梁重置時間較長；

2.但是從橋梁生命週期之累計成本曲線來看，雖然使用者提前維修(門檻值=80 就維修，而不等到 70 時才修)，卻可以大大節省整個生命週期的維護成本。這就是本研究所提及之主動預防式維修概念。利用最佳化模式可建議使用者在橋梁服務時，以「主動式」觀念，告訴使用

者在橋梁達到何種評分值時，是最佳的維修時機，以符合最經濟的概念。

3. 以往的維護，使用者皆無法有效判定何時為最佳的維護門檻，而由上述結果得知，即使以主動式觀念進行維修(門檻=90、80)，無論門檻值過高或過低，皆無法達成最經濟的維護成本，以此例來看，唯有最佳時機點(門檻值=80)，即可達到最經濟的條件。