

貝氏網路應用於海底管線風險評析

Application of Bayesian Network to the Risk Assessment of Offshore Piping

張揚祺*、吳韋興**、楊振峰***

摘要

海事工程有其標準施工作業流程，但是減少工程風險則多有賴於專家經驗與知識，因此當缺少經驗豐富的專家、或只有口語敘述的質性經驗時，如何建立明確的工程風險因子結構，並量化與管控風險因子，實屬重要之課題。本研究將以海事工程中的海底管線鋪設為案例，彙整、分析國內外文獻，並與海事工程公司合作，進行專家訪談，確認海底鋪管之風險因子，接著應用明示結構法，找出各因子的因果網路圖，再藉由專家填寫條件機率表，完成貝氏網路之建構。研究結果顯示出使用貝氏網路進行預測時，前期作業對於後期作業必定產生影響，進行事後推論時，可找出前期作業失誤因子。

關鍵詞：海事工程、風險評估、明示結構法、貝氏網路、海底鋪管

Abstract

Maritime works have developed their own standard construction procedures. To mitigate risk of maritime works depend mainly on the domain experts' experience and know-how. However, problems appear when less experienced experts are available, or qualitative experience exists in a narrative form. It is therefore important to structure clearly an engineering risk factor relation, and quantify and control these risk factors. The proposed study will first collect and

* 國立中山大學海洋環境及工程學系副教授

** 國立中山大學海洋環境及工程學系博士生(聯絡地址: 804 高雄市鼓山區蓮海路 70 號；電話: 07-5252000 Ext.5176；E-mail: trf11v@hotmail.com)

*** 中華醫事科技大學環境與安全衛生工程系講師

review related literatures, and then interview an expert from the designate maritime service company to establish the risk factors associated with offshore piping. Eventually a complete Bayesian network (BN) was formulated using Interpretive Structural Modeling (ISM), and experts' experience was written into a set of prior and conditional probability to be embedded in the BN. The BN can clearly show that certain earlier operational factors affect final operational process deeply. Besides, the backward reasoning using the BN is possible to identify the factors causing a project failure.

Keywords: Maritime engineering, Risk assessment, Interpretive Structural Modeling (ISM), Bayesian network (BN), Offshore piping

壹、前言

近十幾年來海事工程發展蓬勃，由早期的海岸防護工程，到現今的工商業活動之焦點，使得大規模的港灣及工業區不斷被開發，而另一方面，隨著陸域資源與能源逐漸貧乏，也開始重視海洋資源與能源的開發，例如離岸風力發電、鋪設海底管線、開採天然氣與石油等，已在國際間愈來愈受到重視。

然而海岸地區的工程建設，或是海洋能源與資源方面的開發，都是必須依賴強而有力的海事工程技術作為後盾，面對變化多端的海洋環境，一件工程計畫的成功與否，除了工程技術的成熟度等議題，風險方面的管控也是扮演著重要腳色，而Simm and Camilleri (2001)曾提及風險管理能提供工程專案計畫下列三項協助：

- 確定與預知影響計劃成功的項目
- 透過風險優先級別來集中控制危害因子
- 平衡風險控制措施所造成的成本與效益

海事工程的種類甚多，例如：消波塊、基礎拋石、沉箱、防波堤、放流管，打樁與航道疏浚等。而海底管線鋪設工程的用途相當廣泛，舉凡海底電纜、海洋放流管、海底輸油管、海底天然氣輸送管與海底深層水輸送管等，都是海底管線中重要一環，若當海底管線發生問題時，不僅對於海洋環境、生態與被供應方等造成傷害，且後續的維修與補救工程所產生的成本則是難以估計，因此其安全性受到極大重視。

海事工程有其標準施工作業流程，而減少工程風險多半有賴於專家經驗與知識，因此當缺少案例資料與經驗豐富的人員、或只有口語敘述的質性經驗時，如何建立明確的工程風險因素結構，並量化與管控其因素，則為主要之課題。

本研究首先由文獻了解海底鋪管的相關作業資訊，再廣泛收集、彙整文獻確認施工因素後，並與海事工程專家討論，篩選出工程實務上之相關因素。當上述前置動作完成後，利用明示結構法(ISM)結合專家經驗，建構海底鋪管流程工程因素之層級結構圖，並以結構圖為基礎建立作業因素的因果關係圖，接著以此因果關係圖來建立貝氏網路(BN)模型。

貳、方法論

風險評估常使用的方法為專家訪談、德菲法、層級分析法、失誤樹與事件樹分析等，本研究先將海底鋪管施工作業建立層級架構，則分層架構的方法有腦力激盪與明示結構法等方式，由於研究主軸在於因子的相關性，因此選用明示結構法最為建立層級架構的方法。利用網路結構來呈現機率的方式有失誤樹與事件樹等方式，但多半注重單一失誤情形或單一事件為主，所以本研究以貝氏網路來做為主要的網路模型架構。

2.1 明示結構法

明示結構法(ISM)是由Warfield (1973)所提出的電腦輔助方法論。Mandal and Deshmukh (1994)對明示結構法的解釋為：用於進行確認與概述特定因子的關係並解釋問題的方法，ISM 藉由受訪群體，將複雜的因子給予相對的次序關係。ISM 有下列幾項優點，說明如下。

- 以系統化的方式為基礎來吸收專家的意見與知識
- 提供充足機會進行意見修正
- 不需大量運算即可處理具有10~15 個因子之系統，並且可以方便地應用於實際生活案例

Malone (1975)提到 ISM 的基本概念是找出元素集(element set)之前後對應關係(contextual relationship)，使個人與群體了解複雜的系統狀態，進而找出解決問題的行動方案，有鑑於 ISM 具有描述因子間複雜關係的能力，ISM 也常被用來分析影響標準規範的關鍵因子。Ravi and Shankar (2004)認為 ISM 的優點在於探討因子之間的交互影響，並且能將這些影響關係的增強或減緩作用明確列出，所以他們應用 ISM 於供應鏈分析，

探討逆向物流(reverse logistics)的障礙相互作用關係。Hsiao and Liu (2004)為了找出因應市場需求的產品系列，設計一套 ISM 模式，找出符合市場需求的商品。Bolanos et al. (2005)認為 ISM 在複雜的情況下，連接參與人員主觀認知的能力是非常顯著的，因此他們也應用 ISM 於群體決策時，清楚地呈現個人的主觀認知。Faisal et al. (2006)藉由 ISM 了解供應鏈中，不同績效改善因子(enabler)間的影響力，並分析有效的供應鍊風險緩減策略。

由上述可得知 ISM 已應用於許多領域，並作為解決一系列複雜問題的可靠工具，而應用此方法可使問題結構清晰與建立分層，進而呈現問題的結構與因素的優先順序。一般而言，ISM 施作流程步驟如下(Singh and Kant, 2008)：

- A. 藉由調查確認相關的因子
- B. 建立因子間的上下關係，並發展因子的結構交互矩陣(structural self-interaction matrix, SSIM)，來表示系統因子之間的成對關係
- C. 將 SSIM 轉換成二元矩陣，稱作可達矩陣(reachability matrix)，並且檢查矩陣的傳遞性(transitivity)－例如A 與B 有關連而B 與C 有關聯，然而A 與C 有關聯
- D. 將可達矩陣(reachability matrix)的因子關係分成不同層級
- E. 基於上述層級建立ISM層級結構
- F. 檢核模型並檢查不一致的概念，並做必要的修正

2.2 貝氏網路

貝氏網路(Bayesian networks, BN)也被稱為信賴網路(belief networks)、機率網路(probabilistic networks)和因果網路(causal networks) 屬於機率理論中的 Graphical Models (GMs)類型，是用於不確定性問題推理的有效方法(Ben-Gal, 2007)。

Jordan (1999)與 Stich (2004)提到 GMs 加上 undirected edges 一般被稱為馬可夫隨機場(Markov random fields)或是馬可夫網路(Markov networks)，這些網路是以馬可夫毯(Markov blanket)概念為基礎，提供任何兩個不同節點之間獨立的定義，而馬可夫網路泛用於統計物理學(statistical physics)與計算機視覺(computer vision)等領域。

貝氏網路與另一種 GM 結構符合，被稱為有向非循環圖(Directed Acyclic Graph, DAG)，大多應用於醫療診斷、人工智慧、啟發式搜尋與垃圾郵件攔截等等領域，BN 擁有數學上的嚴謹度和直覺式理解，並且能在一組隨機變數上，有效的表示與計算聯合機率分配(joint probability distribution, JPD)(Pearl, 1988)。

DAG 的主要結構分成兩部分：節點(nodes)與有向邊(directed edges)，節點表示隨機變量，且藉由變量名稱作為標記符號，有向邊用來表示變量之間直接依賴，意思為在對應變量之間節點 X_i 連接到節點 X_j ，代表著統計上的相依性(Griffiths and Yuille, 2006)，其結構往往被視為定性(qualitative)的模型，而在需要能夠詳細說明的定量(quantitative)模型部分，參數的描述需要符合馬可夫性質(Markov property)，在每一個節點的條件機率分布(conditional probability distribution, CPD)必須取決於它的父節點，對於離散隨機變量(discrete random variables)的條件機率，常藉由表格來表示，列出子節點與父節點的組合來呈現出局部機率，隨機變量的聯合分配機率，則藉由條件機率表(conditional probability tables, CPTs)來進行計算(Ben-Gal, 2007)。

Enrique, Jose, and Ali, (1997)與Lauritzen, Thiesson, and Spiegelhalter, (1994)認為貝氏網路是由某個領域知識與資料所構成，因此若以符號 B 表示為貝氏網路，則 $B=(D, P)$ ，其中 D 表示 DAG，即表示問題的領域知識，是以圖形方式呈現，而 P 為 DAG 中某一隨機變數的聯合機率分配(JPD)，與該問題的資料直接相關，而其計算公式如下所示，其中 π_i 為 x_i 的父節點。

$$P(X) = \prod_{i=1}^n p(x_i | \pi_i)$$

貝氏網路的推理演算法均基於貝氏定理(Bayes' theory)延伸而來，其推論演算法是由輸入的證據(evidence)來推導其他節點之節點狀態的機率。一般常見的貝氏網路推理模式共分三類，如：exact、approximate 與 symbolic (Enrique et al., 1997)。貝氏定理計算事件發生的條件機率時，需利用事前機率如 $P(E)$ ，而變數 E_i 與 E 兩者的條件機率如 $P(E_i|E)$ ，透過貝氏網路的推理演算法，即可得到事後機率 $P(E_i|E)$ ，計算方式如下所示：

$$P(E_i|E) = \frac{P(E_i)P(E|E_i)}{\sum_{i=1}^n P(E_i)P(E|E_i)}$$

參、海底管線鋪設工程因子評選

3.1 因子選擇

本研究的海底鋪管流程則是參考 Muhlbauer (2004)整理出的 **Incorrect Operations Index** 為基礎，此指標主要為管道工程風險中人為疏失部份，但本研究主要針對施工上之風險，因此以建造(Construction)為主要架構，包含的項目說明如下：

- 查驗(Inspection)：派一名查驗員監督施工過程中的各項項目，主要是檢查施工時的環節有無問題。
- 材料(Materials)：選擇合乎規範與適合的管線材料，並安裝於正確的位置。
- 連接(Joining)：管線連接作業，管線的連接處會比管線本身容易發生問題。
- 回填(Backfilling)：埋設管線作業，此作業也是最容易損傷管線本體的時期。
- 處裡(Handling)：將管線材料做前處理，來適用於施工時的便利性。
- 塗層(Coating)：管線外層塗上塗料防止外部因素對管材產生損害。

藉由上述六項因子為基礎與專家相互討論，進而建立海底鋪管作業流程，作業因子分別為：擬訂工程計畫、路由規劃、掃海、材料選擇、防蝕塗層、管線焊接、鋪設管線&回填、岸上連接與試水，其流程如圖 1 所示。

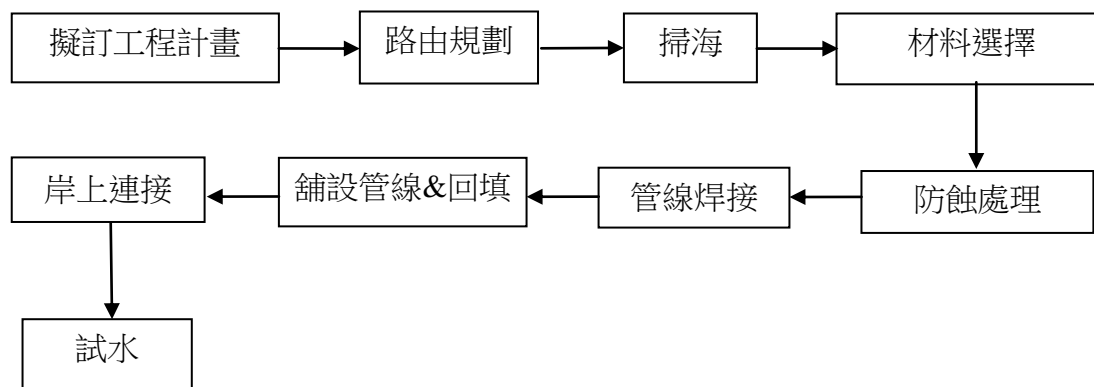


圖 1 海底鋪管作業流程

進一步將圖 1 流程與專家相互討論之後分成三個作業階段，分別為：前期作業、施工作業與後期作業，而各階段的因子主要仍是以 Muhlbauer (2004)整理出的 Incorrect Operations Index 為基礎與專家討論後，增加並分類出 14 個因子類別，如表 1 所示。

表 1 整體流程因子

作業階段	因子
前期作業	擬訂工程計畫
	路由規劃
	掃海
	材料選擇
	測試設備
	工程背景知識
	工程經驗
	相關單位許可審查
施工作業	防蝕塗層
	管線焊接
	設備操作
	鋪設管線&回填
後期作業	岸上連接
	試水

3.2 因子間的相關性

確定作業因子後，則使用ISM先行找出各因子的相關性，而ISM實施步驟乃利用個體或群體腦力激盪模式，來計算二元矩陣(Huang et al., 2005)。例如：評估因子 s_i 是否影響評估因子 s_j ，以下列二元關係矩陣A為例， s_1 為第一個評估因子， s_2 為第二個評估因子， s_3 為第三個評估因子， s_4 為第四個評估因子，在矩陣A中，呈現出1者，表示評估因子間有影響，譬如評估因子 s_1 與 s_2 相互影響，評估因子 s_3 則分別影響評估因子 s_1 與 s_2 ，評估因子 s_2 影響評估因子 s_4 ，而呈現出0者，表示評估因子間無關聯性。

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

建構二元關係矩陣後，可達矩陣可依下列式子計算得出，首先：

$$N = A + I$$

上述公式中矩陣N 被稱為元素關聯矩陣(element connection matrix)，藉由二元關係矩陣A加上單位矩陣I 所得出的矩陣。依據布林運算(Boolean operation)來求得M 可達矩陣(reachability matrix)，其滿足下列條件，建構本研究的可達矩陣M，如表2所示。

$$N \neq N^2 \neq N^3 \neq N^4 \neq N^r = N^{r+1} = M$$

表2 可達矩陣

	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11	s12	s13	s14
s1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
s2	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
s3	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
s4	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
s5	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
s6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s8	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
s9	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
s10	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
s11	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
s12	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
s13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
s14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

層級結構則利用可達矩陣中的可達集合(reachability set)與先行集合(antecedent set)間的交集來建立，可達集合為可達矩陣中元素對應的列，包含有 1 的矩陣元素所對應的行要素的集合，先行集合為可達矩陣中元素對應的行，包含有 1 的矩陣元素所對應列元素的集合，當交集等於可達集合時，其元素為初始層，如表 3 所示，其分層的概念為第一層是最終層，第二層則是中間層級，最後一層則是初始層，本研究因子的層級分別為：第一層為岸上連接與試水，第二層則是擬訂工程計畫、路由選擇、掃海、管線材料選擇、測試水下載具、相關單位許可審查、防蝕塗層、管線焊接、水下載具操作與鋪設管線& 回填，最後第三層則是工程背景知識與工程經驗。

表 3 層級分類

因子編號	可達集合	先行集合	交集	Level
s1	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12	2
s2	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12	2
s3	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12	2
s4	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12	2
s5	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12	2
s6	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s6,s7	s6,s7	3
s7	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s6,s7	s6,s7	3
s8	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12	2
s9	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12	2
s10	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12	2
s11	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12	2
s12	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12	s1,s2,s3,s4,s5,s8,s9,s10,s11,s12	2
s13	s13	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12,s13	s13	1
s14	s14	s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12,s14	s14	1

肆、貝氏網路建構

在網路架構未知與資料不完整的情形下，直接建構網路模型圖是相當困難的問題，而為了解決此問題，依據 Liao, Wan 與 Li (2008)提到明示結構法為基本的系統架構分層技術之一，而它能良好地處理元素間的關係，將問題做分層階級，使整體結構清晰易懂並提高對問題的了解，基於元素間的關係與層級結構，可以容易地得到貝氏網路結構圖。因此將圖 2 的層級架構做為本研究的初始貝氏網路結構圖。

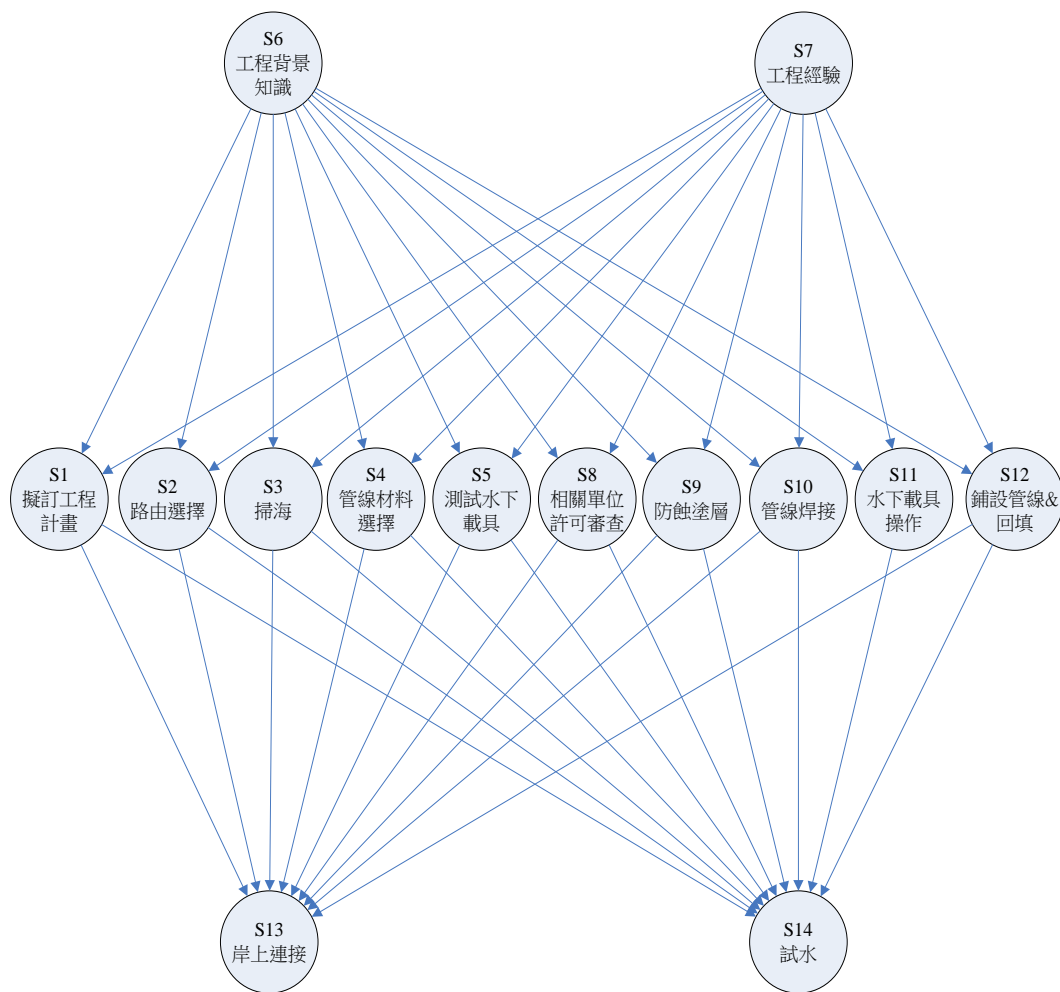


圖 2 初始貝氏網路結構圖

以圖 2 的貝氏網路圖與專家討論，並針對因子間的關係作確認。而專家們認為圖 2 中的因子關係不只有直向的上下關聯性，在橫向方面也應有關聯性。專家們提出在因子間的橫向關係中，部分因子為單向關係，例如 s_2 (Route planning) 影響 s_4 (Material selection) 則表示材料的材質與承受壓力等相關問題需要配合施工環境來選擇；而部分因子為雙向循環關係，例如 s_1 (擬訂工程計畫) 與 s_8 (相關單位許可審查) 兩者互有關聯，此情形為行政上的流程，所以導致雙向都互有影響。以 s_4 與 s_{12} (Pipeline installation & backfill) 兩者的相互關聯性則表示管線須使用何種材料的情況，因此將專家提出的關聯性加入到圖 2 當中，如圖 3 所示。

由於在貝氏網路的結構規則下，是不容許循環架構存在，因此參考 Sucheta and Prakash (2004) 將因果圖轉換成貝氏網路的方式。在與專家訪談當中，本研究保持著 Direct and indirect relationships 跟 Eliminating circular relations 這兩種概念與受訪者持續做討論。舉例來說原本在圖 3 的 s_6 (Background knowledge) 與 s_3 (Side-scan) 為直接連接，

然而與專家討論之後，認為這兩項因子的直接關聯性並不強烈，反而是 s_1 (Project formulation)與 s_2 (Route planning)對 s_3 的影響更為直接，所以消除 s_6 與 s_3 之間的連接。

另一方面在圖 3 的 s_2 (Route planning)與 s_5 (Equipment testing)為循環關係，與專家討論之後，認為先確認施工環境後再決定使用何種設備，因此將 s_5 影響 s_2 的反向關係消除。其餘的因子也藉由與專家相互討論後，來減少過多的連結。而 s_8 (相關單位許可審查)此項因子，主要是判定工程計畫是否通過的主要原因，但對於本研究的初始網路架構來說，若加入橫向連結的狀況下也是導致循環的情況，因此告知專家此情形後，其討論結果為：「在本研究的作業流程中並不考慮行政上的問題」，因此以計畫書會通過審查的條件下，則同意將 s_8 (相關單位許可審查)此項因子，從網路架構消去。修訂的因子是從 $S8\sim S13$ 變更，如表 4 所示，修正後的因子項目為 $S1\sim S13$ ，並且藉由上述的討論來建立本研究的貝氏網路模型，如圖 4 所示。

表 4 修訂因子

編碼	因子
S8	防蝕塗層
S9	管線焊接
S10	水下載具操作
S11	鋪設管線&回填
S12	岸上連接
S13	試水

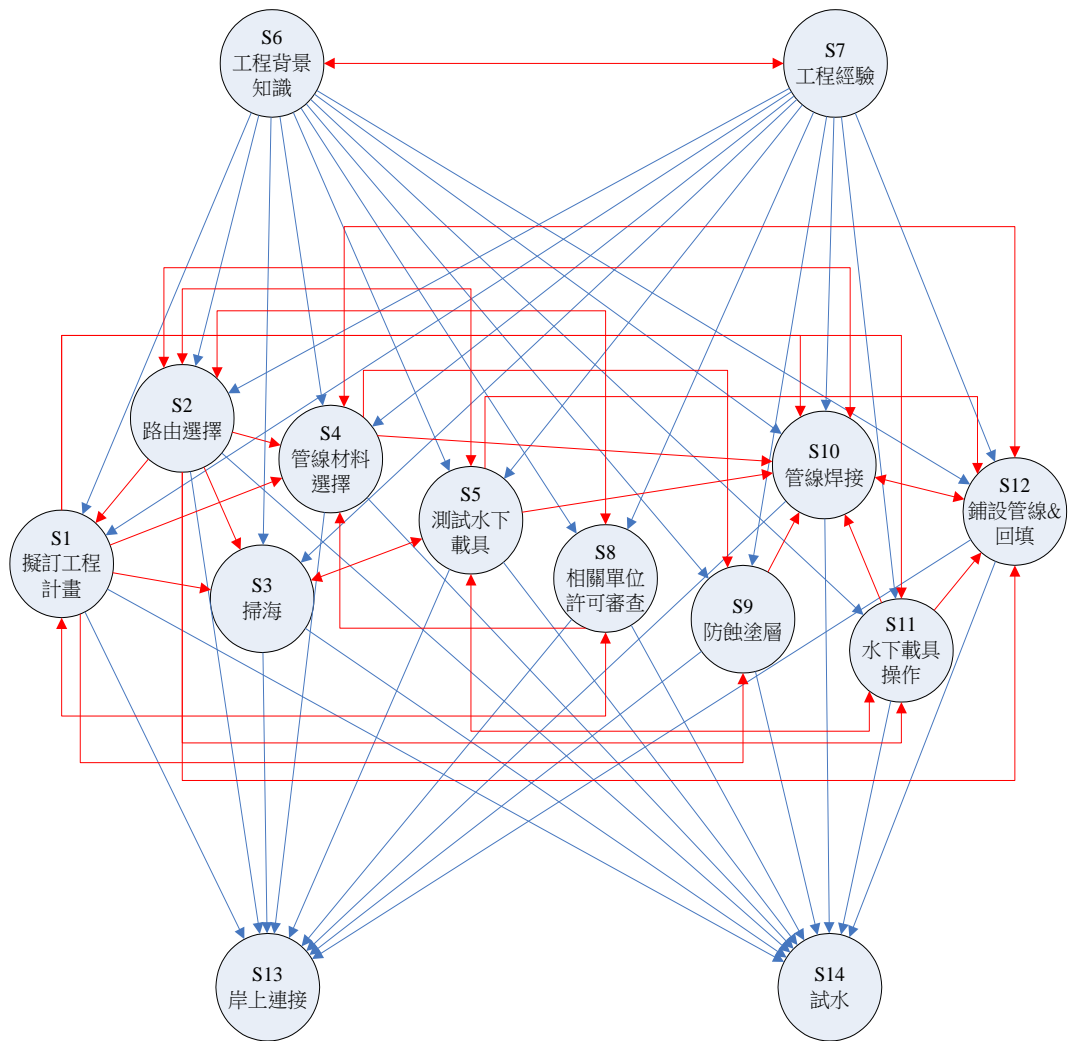


圖 3 加入橫向關係的網路圖

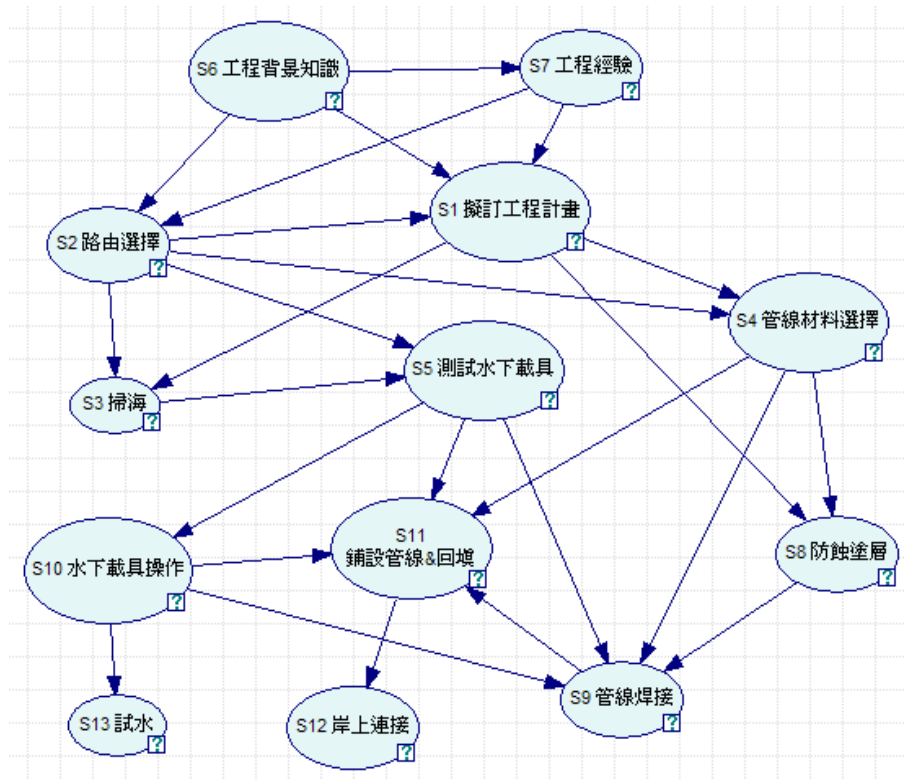


圖 4 貝氏網路

完成的貝氏網路結構則代表鋪管作業因子的因果關係圖解，因此要將各因子以量化方式呈現，則需建立條件機率表，根據 Cain(2001)提到輸入條件機率表的資料訊息來源，一般來說會有四種類型，分別為：

類型一：藉由實際測量所收集到的資料。

類型二：透過與利益相關者(stakeholder)討論所得到的資料。

類型三：藉由實際測量但經過模型校正後所輸出的資料。

類型四：基於理論知識或實際經驗有相當程度的專家，所提供的意見資料。

本研究的主要資料來源為有實際海底鋪管經驗之工程師，來協助完成條件機率表，而專家填寫條件機率表時，必須與專家相互討論因子節點的意義，否則將造成其準確性下降。

伍、模型測試與案例分析

根據圖 4，我們得知各項作業因子間的關係；橢圓形節點代表作業因子，箭頭方向則代表節點間的關係。然而條件機率表的資料來源為有工程經驗的專家協助填寫，「Y」根據因子來表示無問題或充足等正向意義，「N」根據因子來表示失誤或未完善等負向意義。本研究協助填寫條件機率表的專家，對於給予作業因子的機率有些不同，與專家討論之後，可發現 s_1 與 s_2 主要負責前置作業部分， s_{11} 與 s_{12} 則為後端作業部分，藉由這四項節點的測試之後，專家們雖然在條件機率表的機率不同，但調整主要因子時，其概念仍然是相同的，因此本研究則將這些專家所填入的機率做平均整理，所建立的貝氏網路模型，如圖 5 所示。

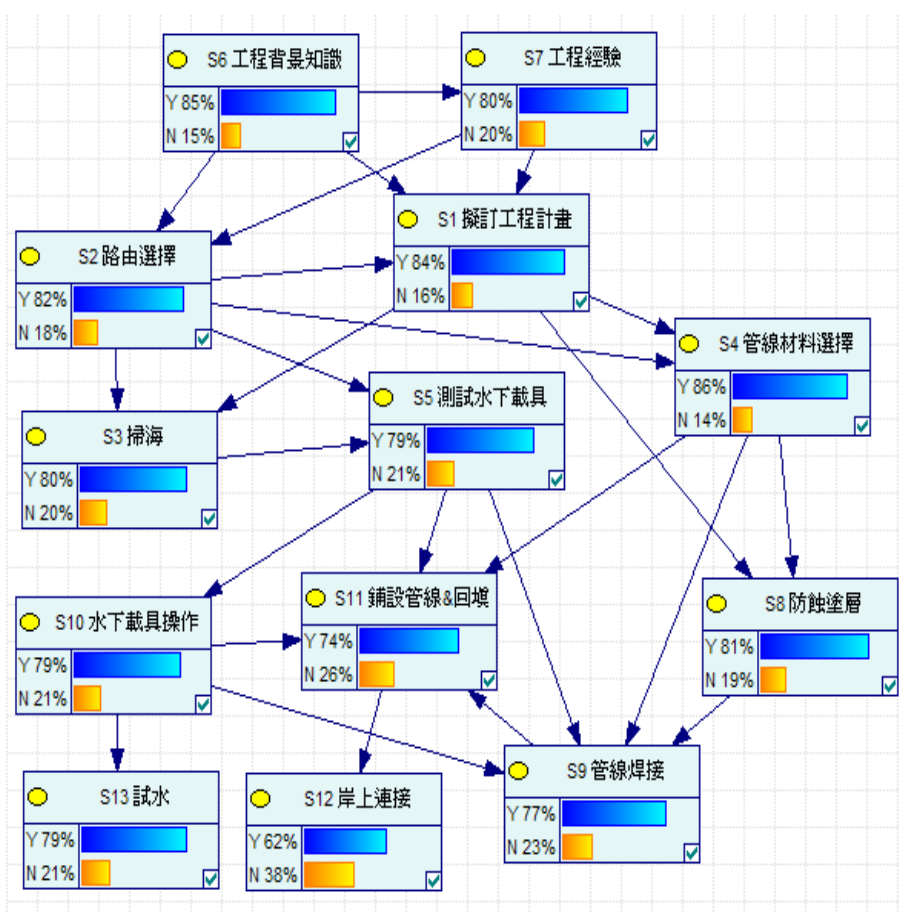


圖 5 貝氏網路模型

本研究將針對貝氏網路的事前預測與事後推理，分別對應相關案例情境，並了解在鋪管流程中，哪些因子在整體工程作業時，是最有可能的風險項目，而造成工程的失誤率提升。

案例一：

台灣中油股份有限公司委託某科技有限公司執行海床地形測繪作業，為CPC18 吋海底油路管線規劃出最安全的路徑。這一組18 吋液化天然氣管線由高雄北方的永安液態天然氣接收站延伸至高雄以西大約85 公里處的F 構造油氣田區。管線將始於永安港南端，預計將朝北轉折以繞過澎湖水道通往F 構造區。(台灣中油，2012)

工作階段：

- 第一階段 高解析之多音束水下地形測繪以及側掃聲納海床形貌調查與底質分類調查。
- 第二階段 初步資料處理及製圖。
- 第三階段 指定路徑執行高解析淺層震測與地質解釋。
- 第四階段 近岸段調查。
- 第五階段 製圖與報告製作。

本案例主要是調查海底管線的可用路徑，因此利用事前資訊來預測工程作業流程中其他因子的機率，而將以上敘述所得之條件，以本研究的條件因子來看，直接對應的有 s_1 (擬訂工程計畫)、 s_2 (路由選擇)與 s_3 (掃海)這三項因子，所以在本研究的網路模型中，首先將這三項因子的「Y」機率都調整為 100%，以便觀察其他節點的變化，主要的情境設定為「當 s_1 (擬訂工程計畫)、 s_2 (路由選擇)與 s_3 (掃海)完善時，則後續因子中那些可能造成失誤？」，如圖 6 所示。

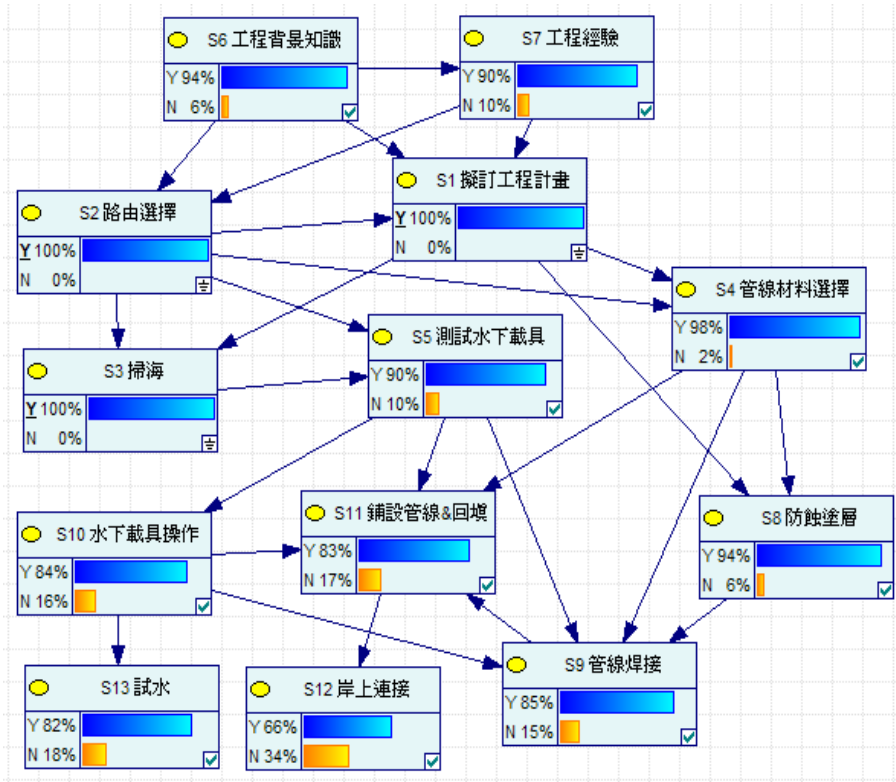


圖 6 s₁、s₂ 與 s₃ 完善的貝氏網路

依據圖 6 可發現到當 s₁、s₂ 與 s₃ 完善時，s₁₂ 的 Y 機率分別為 66%，根據專家的說明當 s₁(擬訂工程計畫)、s₂(路由選擇)、s₁₁(鋪設管線&回填)與 s₁₂(岸上連接)等因子的良好機率約在 75~80%附近時，則整體工程上較不容易發生問題，因此 s₁₂ 在此情形下失誤的風險仍可能發生，進而導致工程進度延誤或增加成本等相關問題。

案例二：

賽普勒斯島乾旱嚴重，需要希臘供應額外用水，因此特別建造一千三百二十公尺長的海底輸水管線來解決用水問題，然而在工程即將完畢時，參與這項計畫的運輸公司表示，這段特別建造的一千三百二十公尺長海底管線，還差三點五公尺才能接上連接至配水中心的陸上管線，而連接運水船的管線不夠長，相關單位認為是專家估算錯誤所造成 (Agence France Presse, 2008)。

根據上述案件敘述，搭配本研究的作業流程因子，直接對應的因子為 s₇(工程經驗)與 s₁₂(岸上連接)這兩項因子，所以在本研究的網路模型中，首先將這兩項因子的「N」機率都調整為 100%，以便觀察其他節點的變化，並根據事後發生的事件來推理其他可能的風險因子，如圖 7 所示。

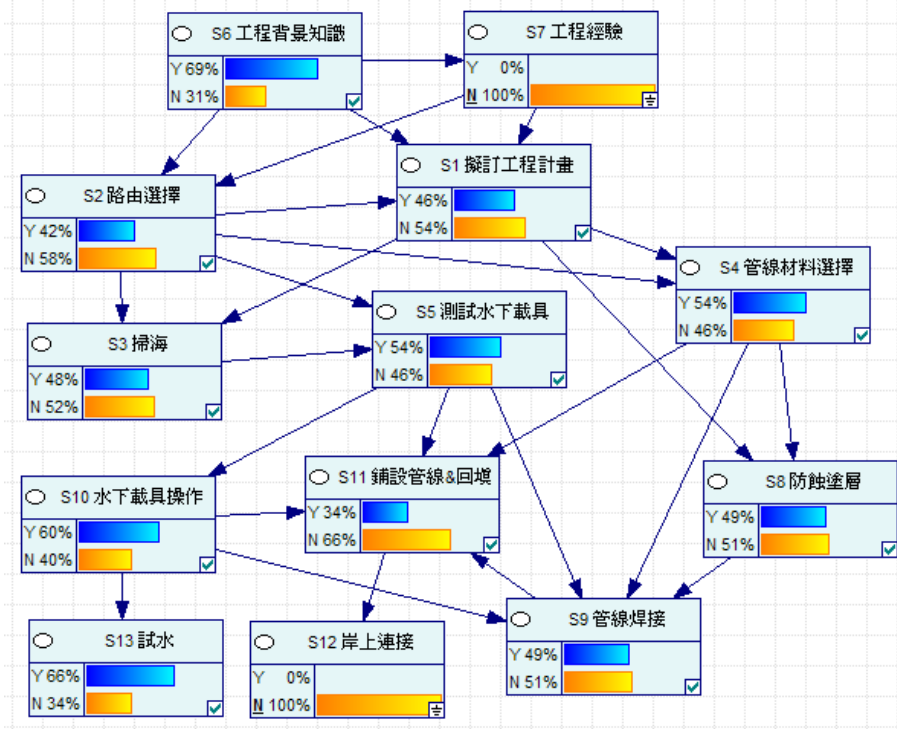


圖 7 s7 與 s12 不完善的貝氏網路

首先以圖 7 的網路結構來說明，調整 s7 與 s12 的 N 機率為 100% 後，發現到專家提到的四個判定工程是否順利的主要因子，其中三個的 Y 機率為 s1(46%)、s2(42%) 與 s11(34%)，對應此情境確實發生了工程失誤的問題，並且驗證了專家所說的判別因子，對工程的進行是有重大影響力。

陸、結論與建議

6.1 結論

本研究提出對於海事工程可提供一種系統化整合性方法，用來預測施工流程中，主要影響工程作業的因子，而當工程已發生事故時，來估算各流程的因子間的因果關係與推理可能的發生機率，以提供決策者執行防護作業時的參考，因此期許此方法能在海事工程方面的風險管理做一個未來性的指標架構，綜合本研究的分析結果說明如下：

- A. 貝氏網路的優點在於包含圖形模型與機率上的概念，然而最主要的網路建構，則是關係到整體模型的條件機率填寫與推論時的計算，因此本研究首先利用 ISM 法建構出初始因子層級結構，來降低與專家們討論網路結構的時間，同時建立初始的因果關係。

- B. 藉由鋪管流程來探討其因果關係，以本研究貝氏網路呈現出來的結果顯示，前期作業的缺失對於後期作業的進行勢必產生影響，而後期作業發生問題時，利用網路推論可找出哪些前期作業因子為影響的風險項目。

6.2 建議

本研究提出初步海事工程的風險管理網路架構，但礙於資源因素等原因仍有許多不足之處，以現階段的貝氏網路模型要應用於實際的海事工程作業並不容易，針對研究過程中所發現的問題，經整理之後如下所示，以作為後續研究的改進。

- A. 研究中所提出的施工流程因子，主要是象徵性的因子，在現實情況中則需要詳細細分與定義施工因子項目。
- B. 研究中只有談論施工流程因子，但若加入其風險事件，搭配 ISM 等層級結構方法，更能加強對分層結構的依賴，且更加使得網路結構貼近現實情形。
- C. 實際工程作業的狀態應是多狀態情形，因此未來的貝氏網路中，在各因子節點的狀態情形，除了 Y 與 N 這兩種情形之外，應能加入符合該因子的狀態，使得貝氏網路能更加貼近現實情形。

柒、參考文獻

1. Agence France Presse (2008, Jul 7). Thirsty Cyprus left three metres short of water supplies. Retrieved May 20, 2011, from <http://afp.google.com/article/ALeqM5gi4UUBvHgbvtiRsDEbSJjRpt5KTQ>
2. Ben-Gal, I. (2007), Bayesian Networks, In: Ruggeri F., Faltin F. and Kenett R. (Eds.), Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability, John Wiley and Sons.
3. Bolanos, R., Fontela, E., Nenclares, A. and Pastor, P. (2005), "Using interpretative structural modeling in strategic decision-making groups", Management Decision, Vol. 43 No. 6, pp. 877-95.
4. Cain, J., (2001). Planning improvements in natural resources management. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK.
5. Enrique, C., Jose, M.G., and Ali, S.H. (1997), Expert Systems and Probabilistic Network Models, Springer-Verlag, New York.
6. Faisal, M.N., Banwet, D.K. and Shankar, R. (2006), "Supply chain risk mitigation: modeling the enablers", Business Process Management Journal, Vol. 12 No. 4, pp. 535-52.
7. Griffiths, T.L. and Yuille, A. (2006), A primer on probabilistic inference, Trends in

- Cognitive Sciences Supplement to special issue on Probabilistic Models of Cognition, 10(7), pp. 1–11.
8. Hsiao, S. and Liu, E. (2004), “A structural component-based approach for designing product family”, *Computers in Industry*, Vol. 56, pp. 13-28.
 9. Huang, J-J., Tzeng, G.-H. and Ong, C.-S. (2005), “Multidimensional data in multidimensional scaling using the analytic network process”, *Pattern Recognition Letters*, 26(6), pp.755-767.
 10. Jordan, M.I. (1999), *Learning in Graphical Models*, MIT Press, Cambridge.
 11. Lauritzen, S., Thiesson, B., and Spiegelhalter, D. (1994), Diagnostic systems created by model selection methods: A case study, In Cheeseman, P. and Oldford, R., editors, *AI and Statistics IV*, volume Lecture Notes in Statistics, 89, pages 143-152. Springer Verlag. New York.
 12. Malone, D.W. (1975), “An introduction to the application of interpretative structural modeling”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62 No. 3, pp. 397-404.
 13. Mandal, A. and Deshmukh, S.G. (1994), “Vendor selection using interpretative structural modeling”, *International Journal of Operations and Productions Management*, Vol. 14 No. 6, pp. 52-9.
 14. Muhlbauer, W. Kent (2004), “Pipeline Risk Management Manual”, Third edition. Gulf Professional Publishing.
 15. Pearl, J. (1988), *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems*, Morgan Kaufmann, San Francisco.
 16. Ravi, V. and Shankar, R. (2004), “Analysis of interactions among the barriers of reverse logistics”, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 72 No. 8, pp. 1011-29.
 17. Simm, J. D. and Camilleri, A. J. (2001), “Construction Risk in Coastal and River Engineering”, *Water and Environment Journal* Vol 15, Issue 4, pp. 258–264.
 18. Singh, M.D. and Kant, R. (2008), "Knowledge management barriers: An interpretive structural modeling approach", *International Journal of Management Science and Engineering Management*, Vol. 3, No. 2, pp. 141-150.
 19. Stich, T. (2004), *Bayesian networks and structure learning*, Diploma Thesis, Computer Science and Engineering, University of Mannheim.
 20. Sucheta Nadkarni, and Prakash P. Shenoy , (2004), ”A causal mapping approach to constructing Bayesian networks”, *Decision Support Systems* Vol 38, pp. 259–281.
 21. Warfield, J. N. (1973), “On Arranging Elements of a Hierarchy in Graphic Form”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC3(2) , pp.121-132.
 22. Xiu-wu Liao, Tao Wan, Yuan Li (2008), "A Bayesian Network Model under Group Decision Making for Evaluating IT Outsourcing Risk," 2008 International Conference on Risk Management & Engineering Management, Icrmem, pp.559-564.

23. 台灣中油股份有限公司(2012)。高雄外海 F 構造油氣田開發計畫之環境影響差異分析報告(修訂稿):附錄八，
<http://eia.report.epa.gov.tw/EIAWEB/DownloadFiles.ashx?sHcode=1001963A&sFileName=20120816-2.pdf&sDir=eiaetc&sType=a>