

快速道路交通安全改善策略之模糊成本效益分析

鄧振源* 莊弼昌**

摘 要

快速道路在交通安全考慮上，較一般道路為高；為確保快速道路之交通安全，必須定期檢討並改善交通安全。改善交通安全策略（方案）所需費用有限，無法將全部策略付諸實施，必須從中選取改善效益（如減少交通事故）較大者實施。過去經常應用增量成本效益分析法（Incremental Cost-Benefit Analysis），其前提須明確地衡量所需之成本與可能達成之效益。由於不確定性之存在，欲明確地衡量有其困難性。鑑此，本文擬應用模糊集理論（fuzzy sets theory）於增量成本效益分析法中，使改善交通安全策略之評估，更具合理性與客觀性。

一、前言

都市交通管理中，對於快速道路之順暢與安全，為都市交通規劃重要目標之一，以期能提高運輸之服務品質，並進而改善都市交通問題。快速道路在交通安全之考量，常較一般道路為高；因此，為確保快速道路之交通安全，權責單位必須定期檢討並提出改善策略，同時編列年度預算，以有效執行快速道路交通安全之改善。

快速道路交通安全之課題，係檢討對人員事故之危險與阻礙交通順暢之原因。由於快速道路之結構與行駛之基本特性，在交通安全設施之配置上，有其特殊之需求。因此，在擬定安全對策方案時，需以各路線之個別對策加以考量，並編列相關預算。由於政府預算有限，對於所有安全對策之改善方案無法全部進行，必須從各種改善方案中加以評估，使有限的預

* 華梵人文科技學院工業管理系副教授

** 中央警察大學交通學系助教

算用在交通安全改善最大效果的對策上（秋山孝正等，1991）。

交通安全對策所需之費用，各改善對策無法單獨明確地估計，只能概略地估算。在交通安全改善對策之效果（如交通事故之減少）方面，也難以用明確的數值加以衡量。另外，在預算的估算上，亦無法精確地加以估計，只能概略地估計在某一範圍內。因此，進行交通安全改善策略之評選時，必須考量模糊性（fuzziness），方能使評估結果更符合現實狀況。

本文擬應用增量成本效益分析法（Incremental Cost-Benefit Analysis Approach）進行分析，並將模糊性加以考量，使模式更符合實際情形。本文首先介紹增量成本效益分析法之特性，其次說明模糊集之概念並進一步發展出模糊增量成本效益分析法，最後並以一簡單應用例說明模式之應用。

二、增量成本效益分析法

傳統交通改善方案之評估，率皆應用成本效益分析法，並且利用效益成本比值（benefit-cost ratio）進行方案優劣之比較。所謂效益成本比值法，係計算方案預期效益之現值（present worth）或年值（annual worth）與所需成本之現值或年值，並分別以B與C表示，然後求取B/C之係數值。該方案是否可被接受，其決策準則為（賴士葆，1989）：

$$\left. \begin{array}{l} B/C > 1, \text{ 方案應予接受} \\ B/C < 1, \text{ 方案應予拒絕} \\ B/C = 1, \text{ 方案可以接受或拒絕} \end{array} \right\} \quad (1)$$

此一決策準則係針對單一方案之評估而言。

當有許多方案須同時進行比較時，交通方案之評估比較可區分為排序法（ranking approach）與增量分析法（incremental approach）二種方法（White, et al., 1989）。就成本效益分析而言，前者係將各方案之B/C值求取後，在依B/C值之大小加以排序；後者則利用各方案相互間效益之增量（ ΔB ）與成本之增量（ ΔC ），求取 $\Delta B/\Delta C$ 之比值，再依（1）式之決策法則比較兩個方案之優劣。應用排序法進行效益成本比值分析時，容易發生錯誤之決策，將優勢方案排序在後（Steiner, 1992）。因此，進行交通方案之成本效益評估時，必須利用增量分析法才是正確的方法。

增量成本效益分析法進行多個方案比較之前，首先將各方案之成本項

由小而大加以排序，以決定增量比較之次序。在此方法中，將方案區分為衛冕者（defender）與挑戰者（challenger），前者係指在比較過程中，該方案繼續與其他方案比較之方案，後者則指與衛冕者方案比較之新方案。有關增量成本效益分析法之流程，詳如圖一所示。

三、交通安全改善方案與模糊性

都市快速道路之交通安全問題，有各種的原因，諸如偶發事故、道路結構問題、交通量過大等等，對於事故發生頻繁的地點須進行檢討，例如轉彎處、車流併流、分流點附近等，以進一步了解發生問題之真正原因並提出改善對策，例如增加閃光號誌、設置警告或注意標誌、路面標線改善等等。每一條快速道路均有各種不同之改善對策，各種改善對策之不同組合，即可構成該路線之不同改善方案；因此，每一條快速道路均有許多可行之改善方案。

每一條快速道路之可行改善方案，因係由各種不同之對策所組成，因此可以估計出不同之改善成本與改善效益。由於政府預算有限，無法將每一快速道路之改善對策均付諸實施，必須就每一快速道路中選取最佳之改善方案進行改善（只包括部分最有效之改善策略），同時每一快速道路亦只有一最佳改善方案被執行。然而在有限預算下，並非每一快速道路均可獲撥付預算以執行該道路之最佳改善方案，此時必須從所有快速道路中選取其中最有效之幾個方案進行改善，以符合預算之限制。

快速道路改善方案中包括各種不同之改善對策，每一改善對策所需之成本與預期達成之效益，在未來不確定性因素下，欲正確地以某一明確數值表示，實屬困難之事。因此在衡量時，可能只概略知道可能近似的範圍，只是在某些範圍較明確，某些範圍較含糊。基於此一特性，快速道路各改善方案之效益與成本均具有模糊性，可利用梯形模糊數（trapezoidal fuzzy numbers）表示。

若以 $\tilde{G}_{ij}$ 表示第 i 條（ $i=1,2,\dots,R$ ）快速道路第 j 個（ $j=1,2,\dots,n_i$ ）交通安全改善方案預期達成之改善效益，則 $\tilde{G}_{ij}$ 為實數集合之模糊子集，可用下式表示（Buckley, 1985）：

$$(\alpha/\beta, \gamma/\delta) \quad (2)$$

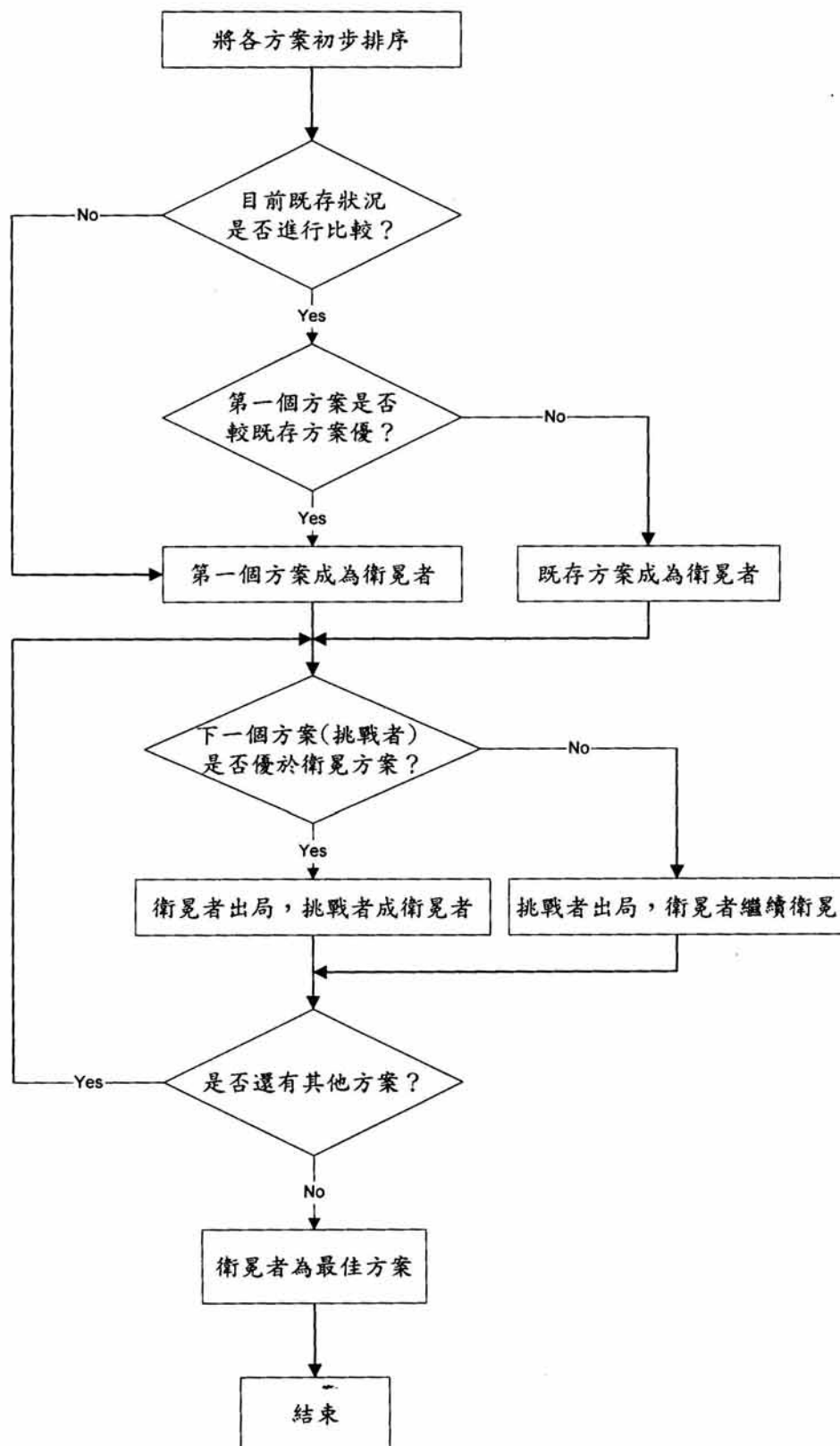


圖1 增量成本效益分析流程

其中 α 、 β 、 γ 、 δ 為實數，且 $\alpha \leq \beta \leq \gamma \leq \delta$ 。因此，隸屬函數 $\mu_{\tilde{G}_{ij}}$ 之圖形，可利用此四個實數求取。

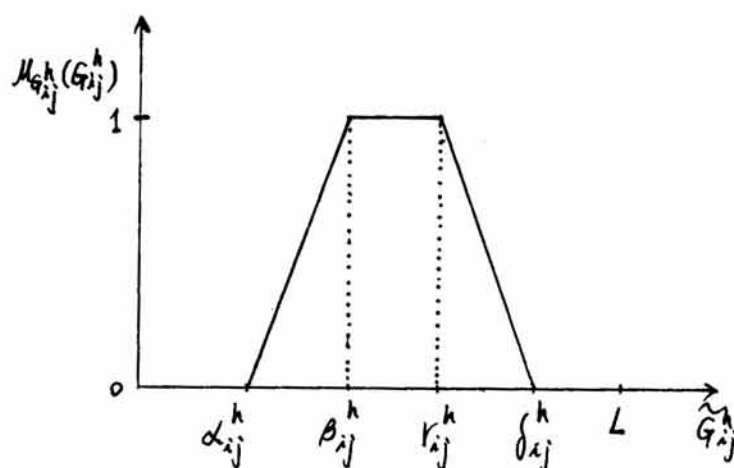
由於第 j 個改善方案係由許多改善對策組合而成，因此，改善方案達成之模糊效益，亦由所包含改善對策之模糊達成效益所累加。個別對策之模糊達成效益為梯形模糊數，則改善方案之模糊達成效益經加總後，亦為梯形模糊數（Kaufmann and Gupta, 1988）。進行改善方案之評估時，必須先就個別改善對策進行估計。設若第 i 條道路第 j 個交通安全改善方案包含 m 個改善對策，則其中第 h 個（ $h=1, 2, \dots, m$ ）改善對策之模糊達成效益可用 $\tilde{G}_{ij}^h$ 表示如下：

$$\tilde{G}_{ij}^h = (\alpha_{ij}^h / \beta_{ij}^h, \gamma_{ij}^h / \delta_{ij}^h) \quad (3)$$

且 $\tilde{G}_{ij}^h$ 梯形模糊數之隸屬函數 $\mu_{\tilde{G}_{ij}^h}(G_{ij}^h)$ 如下式所示：

$$\mu_{\tilde{G}_{ij}^h}(G_{ij}^h) = \begin{cases} 0 & , G_{ij}^h < \alpha_{ij}^h \\ \frac{G_{ij}^h - \alpha_{ij}^h}{\beta_{ij}^h - \alpha_{ij}^h} & , \alpha_{ij}^h \leq G_{ij}^h \leq \beta_{ij}^h \\ 1 & , \beta_{ij}^h \leq G_{ij}^h \leq \gamma_{ij}^h \\ \frac{\delta_{ij}^h - G_{ij}^h}{\delta_{ij}^h - \gamma_{ij}^h} & , \gamma_{ij}^h \leq G_{ij}^h \leq \delta_{ij}^h \\ 0 & , G_{ij}^h > \delta_{ij}^h \end{cases} \quad (4)$$

此一隸屬函數 α 以左之隸屬程度為0，在 $(\alpha, 0)$ 至 $(\beta, 1)$ 之隸屬程度為連續且嚴格遞增，在 $(\beta, 1)$ 至 $(\gamma, 1)$ 之間為水平直線部份，在 $(\gamma, 1)$ 至 $(\delta, 0)$ 之隸屬程度為連續且嚴格遞減， δ 以右之隸屬程度為0，詳如圖二所示。



圖二 改善對策模糊達成效益圖

根據各改善對策之模糊達成效益 $\tilde{G}_{ij}^h$ ，即可依下式求得各改善方案之模糊達成效益：

$$\tilde{G}_{ij} = \tilde{\sum}_h G_{ij}^h, \quad \forall i, j \quad (5)$$

其中 $\tilde{\sum}$ 表示模糊加總 (fuzzy addition)。

在成本估計方面，亦如效益之推估。第 i 條道路第 j 個交通安全改善方案之模糊總成本 $\tilde{TC}_{ij}$ ，係由各改善方案所包含 m_{ij} 個改善對策之模糊成本 $\tilde{C}_{ij}^h$ 加總而得，即

$$\tilde{TC}_{ij} = \sum_h C_{ij}^h, \quad \forall i, j \quad (6)$$

四、交通安全改善方案評估模式

本文進行快速道路交通安全改善方案之評估時，係假設以每一快速道路為評估單位；如果考慮實際狀況時，亦可就各預算單位實際去劃分評估之單位，如以某一劃分區或每一路段為單位。每一評估單位可能有許多可行之改善對策，並可組合成許多可行之改善方案。由於預算有限下，無法將各評估單位之所有可行方案付諸施行，必須從中選取改善效果較佳之方案進行改善。基於公平性考量下，本文假設每一評估單位優先以最佳方案為改善方案，如果預算足夠時，各評估單位均有一改善方案被執行，此時方可考慮一評估單位有二個方案被執行之情形，如果各評估單位有二個方

案被執行後，方可考慮一評估單位有三方案被執行之情形，餘類推。基於此一考量原則下，本文所提出之評估模式，區分為二階段進行。

1.階段一：各評估單位（各條路線）最佳改善方案之評選

每一評估單位均有許多可行之改善方案，在非模糊狀況下，可應用增量成本效益評估法進行評估，以找出最佳改善方案。即應用（1）式以決定最後衛冕者的改善方案，或用下式亦可得到相同結果：

$$\Delta(B-C)_{j-j'} > 0 \quad (7)$$

其中j方案為挑戰者，j'方案為衛冕者，如果（7）式成立，則j方案取代j'方案而成為衛冕者。

當考慮模糊狀況時，模糊增量益本比 $\tilde{\Delta}(B/C)_{i(j-j')}$ 與模糊增量益本差 $\tilde{\Delta}(B-C)_{i(j-j')}$ ，可分別由下式求取：

$$\tilde{\Delta}(B/C)_{i(j-j')} = (\tilde{G}_{ij} \ominus \tilde{G}_{ij'}) \oslash (\tilde{TC}_{ij} \ominus \tilde{TC}_{ij'}), \forall i \quad (8)$$

$$\tilde{\Delta}(B-C)_{i(j-j')} = (\tilde{G}_{ij} \ominus \tilde{G}_{ij'}) \ominus (\tilde{TC}_{ij} \ominus \tilde{TC}_{ij'}), \forall i \quad (9)$$

其中 $\ominus$ 表示模糊減法（fuzzy subtraction）， $\oslash$ 表示模糊除法（fuzzy division）。因此改善方案之決策準則分別為

$$\tilde{\Delta}(B/C)_{i(j-j')} \succeq \tilde{1}, \forall i \quad (10)$$

$$\tilde{\Delta}(B-C)_{i(j-j')} \succeq \tilde{0}, \forall i \quad (11)$$

其中 $\succeq$ 表示模糊大於之符號； $\tilde{1}$ 為（1/1，1/1）之模糊數，即為1之明確值； $\tilde{0}$ 為（0/0，0/0）之模糊數，亦為0之明確值。在模糊狀況下，（11）式之決策準則優於（10）式，因模糊減法仍可得梯形模糊數，但模糊除法只能得近似之梯形模糊數。因此本文進行各評估單位最佳改善方案之評選時，係以（11）式為決策準則。

如何決定（11）式左手項之模糊數大於0，此時必須將 $\tilde{\Delta}(B-C)_{i(j-j')}$ 模糊數非模糊化（defuzziness），即找出該模糊數之最佳明確值。本文應用區域中心法（center-of-area）求取最佳明確值（鄧振源,1991）。設若模糊數 $\tilde{\Delta}(B-C)$ 之最佳明確值為 $CD(\tilde{\Delta}(B-C))$ 則可由下式求取：

$$cD(\tilde{\Delta}(B-C)) = \frac{[(Y+Z)^2 - YZ] - [(W+X)^2 - WX]}{3[(Z-W) + (Y-X)]} \quad (12)$$

其中

$$W = \sum_h \alpha_{ij}^h - \sum_{h'} \alpha_{ij}^{h'} \quad (13)$$

$$X = \sum_h \beta_{ij}^h - \sum_{h'} \beta_{ij}^{h'} \quad (14)$$

$$Y = \sum_h r_{ij}^h - \sum_{h'} r_{ij}^{h'} \quad (15)$$

$$Z = \sum_h \delta_{ij}^h - \sum_{h'} \delta_{ij}^{h'} \quad (16)$$

經由非模糊化過程後，(11)式之決策準則成為

$$cD[\tilde{\Delta}(B-C)_{i(j-j')}] > 0 \quad (17)$$

根據上式即可進行模糊增量益本差分析。

2.階段二：在預算限制下，進行各評估單位優勢改善方案之評選。

進行交通安全之改善，年度預算亦為一模糊狀況，即預算規劃時，可能提供之預算係在某一範圍之內，其中有較明確之區間，因此亦可用梯形模糊數表示，即

$$\tilde{B} = (\alpha_b/\beta, r_b/\delta_b) \quad (18)$$

在此一預算下，必須就各評估單位之最佳改善方案，再次應用模糊增量分析法進行必較，最後之衛冕者為最佳方案，最後被淘汰者為次佳方案，依次類推可得到各評估單位之優勢順序。

為求取最後執行之交通安全改善方案，必須在可能預算範圍內選取較佳之執行方案 A^* 。因此，評選之過程係由 R 個評估單位(本文以快速道路路線為單位)中，從最佳之改善方案 A_{i+1} 選取，計算其所需之成本 TC_{i+1} 是否在預算範圍內，如預算尚足夠，則累加 R 個評估單位中之次佳改善方案，並計算其累加成本是否在預算範圍內，如此依次進行評選，直至預算不足為止。若 R 個評估單位之最佳方案均被執行後，預算仍有餘額時，則繼

續從 R 個評估單位之次佳方案選擇，即從 R 個次佳方案中之最佳方案 A_{i+2} 選取，其過程一如 R 個最佳方案之評選過程。因此，執行方案 A^* 之較佳方案，可依下式來決定：

$$\tilde{B} \ominus (\sum_{s=1}^{\tilde{S}} \sum_{k=0}^{\tilde{K}} \tilde{TC}_{(\lambda^*-k)s}) \geq \tilde{0} \quad (19)$$

$$A_k^* = A_{t-1}^* \cup \{A_{(\lambda^*-k)s}^*\} \quad (20)$$

在(19)式中，決定預算是否尚有餘額，仍需將模糊數進行非模糊化，若下式成立則有多餘預算，

$$CD(\tilde{B}) - CD(\tilde{Q}) > 0 \quad (21)$$

其中

$$\tilde{Q} = \sum_{s=1}^{\tilde{S}} \sum_{k=0}^{\tilde{K}} \tilde{TC}_{(\lambda^*-k)s} \quad (22)$$

有關此一評選過程，詳如圖 3 之求解程序所示。

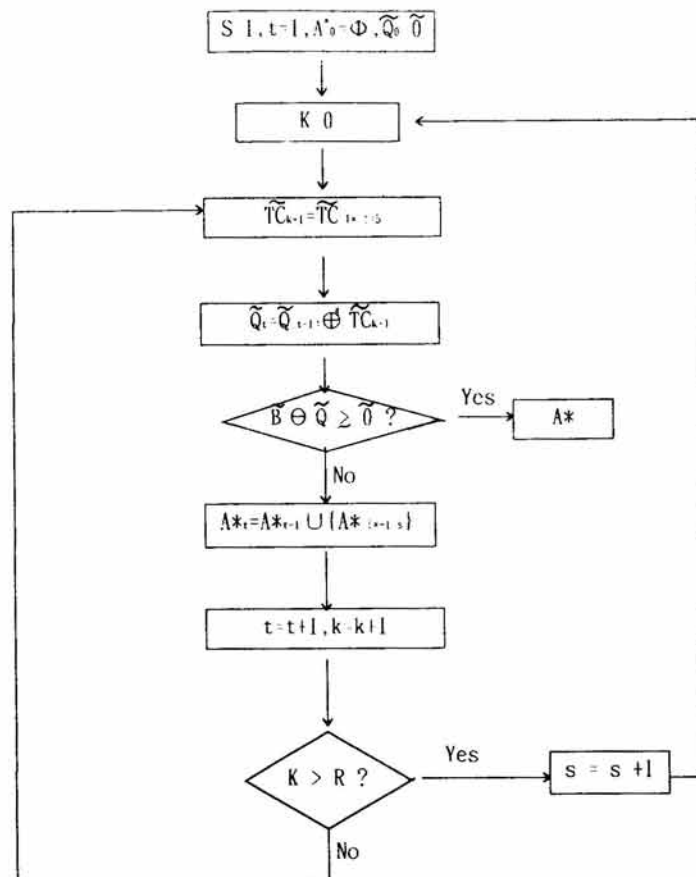


圖 3 各評估單位執行方案評選程序圖

五、簡例說明

(一)問題說明

設若 XYZ 都會區內有 5 條快速道路，經年度檢討交通安全問題後，分別提出改善閃光號誌、警告標誌、注意標誌、路標指示、路面標示、路燈更換、路面維修等改善對策，各路線為評估單位下，可分別得到 5 條路線之改善方案為 2、4、3、5、3 個。該都會區明年度可能提供之預算為 $B=(5200/6500, 7000/8000)$ ，亦即預算大概在 5200 萬至 8000 萬元之間，最有可能是在 6500~7000 萬元。

(二)各路線可行方案之評估

為簡化說明，設若第 1 條路線 2 個可行改善方案(A_{11}, A_{12})分別包括 4 或 6 個可行對策，經加總其可行對策之模糊效益與模糊成本後，得到模糊數(單位:萬元)分別為：

$$\tilde{G}_{11}=(9200/9800, 10000/11000)$$

$$\tilde{G}_{12}=(12000/13000, 15000/16000)$$

$$\tilde{TC}_{11}=(820/850, 900/950)$$

$$\tilde{TC}_{12}=(1200/1280, 1300/1350)$$

依 2 個改善方案之模糊成本，經求得其明確值後，得到

$$CD(\tilde{TC}_{11})=880.74$$

$$CD(\tilde{TC}_{12})=1280.59$$

故知 A_{11} 之成本較 A_{12} 之成本少，故先安排為衛冕者，而 A_{12} 則為挑戰者。

依模糊增量分析，得到

$$\tilde{\Delta}(B-C)_{2-1}=(470/2550, 4820/6550)$$

求得其非模糊化之明確值大於 0，即

$$CD(\tilde{\Delta}(B-C)_{2-1})=3584.19 > 0$$

顯然地， A_{12} 優於 A_{11} ，即 A_{12} 為第 1 條路線之最佳改善方案，而 A_{11} 則為次佳改善方案。

$$A_1=(A_{12}, A_{11})$$

其餘 4 條路線亦用相同方法求得改善方案之優劣順序，最後得到

$$A_2=(A_{21}, A_{24}, A_{22}, A_{23})$$

$$A_3=(A_{33}, A_{31}, A_{32})$$

$$A_4=(A_{45}, A_{42}, A_{44}, A_{43}, A_{41})$$

$$A_5=(A_{51}, A_{52}, A_{53})$$

(三)預算限制下執行方案之評選

基於預算限制與各路線公平性考量下，首先評估各路線最佳方案均被執行後，是否尚有餘額，然後再繼續評估各路線之次佳方案。依本例而言，5 條路線之最佳改善方案，其模糊效益與模糊成本如表 1 所示。經計算各方案之明確值後，開始時依 A_{51} 、 A_{33} 、 A_{12} 、 A_{21} 、 A_{45} 之順序，進行模糊增量分析。

根據模糊增量分析結果，顯示最初 A_{51} 為衛冕者， A_{33} 為挑戰者，由於 $\Delta(B-C)_{A_{33}-A_{51}} < \tilde{0}$ ，故 A_{33} 方案挑戰失敗， A_{51} 方案仍為衛冕者，其結果如表 2 所示。

表 1 各路線最佳改善方案之模糊成本與效益

路線	最佳方案	模糊成本	模糊效益	CD
1	A_{12}	(1200/1280, 1300/1350)	(12000/13000, 15000/16000)	1281
2	A_{21}	(1500/1600, 1700/1800)	(10800/12500, 14200/16200)	1650
3	A_{33}	(800/950, 1200/1440)	(9500/10200, 11000/12900)	820
4	A_{45}	(2060/2280, 2500/2780)	(15100/16300, 17400/18700)	2412
5	A_{51}	(620/730, 800/980)	(8800/9200, 12000/14300)	786

表 2 模糊增量分析結果

$j-j'$	$\tilde{\Delta}(B-C)_{j-j'}$	$CD(\tilde{\Delta}(B-C)_{j-j'})$
$A_{33}-A_{51}$	(-5620/-2270, 1650/4280)	-515.96<0
$A_{12}-A_{51}$	(-3030/430, 5320/6980)	2373.46>0
$A_{21}-A_{12}$	(-3100/750, 3600/6640)	1935.56>0
$A_{45}-A_{21}$	(-2380/1200, 4320/7640)	2683.62>0

* j, j' 分別表示挑戰者與衛冕者。

最後得到 5 個改善方案之優先順序為 $A_{45} > A_{21} > A_{12} > A_{51} > A_{33}$ ，其中符號 $>$ 表示優於之義。

在年度預算限制下，根據本文所提出之評選程序，累加 A_{45} 、 A_{21} 、 A_{12} 、 A_{51} 四個改善方案後，其累積總成本為 $\tilde{Q}_4=(5380/5890, 6320/6910)$

經計算後，得到

$$\tilde{B} \ominus \tilde{Q}_4=(-1710/180, 1110/2620)$$

$$\text{因 } CD(\tilde{B} \ominus \tilde{Q}_4)=529.53 > 0$$

顯示預算尚有可能之餘額，若再累加 A_{33} 方案後，其累加總成本為

$$Q_5=(6180/6840, 7520/8350)$$

經計算後，得到

$$\tilde{B} \ominus Q_5=(-3150/-1020, 160/1820)$$

$$\text{因 } CD(\tilde{B} \ominus Q_5)=-571.64 < 0$$

顯示可能之預算已不足執行 A_{33} 改善方案。因此，在可能之預算下，下年度可進行之交通安全改善方案為

$$A^*=(A_{45}, A_{21}, A_{12}, A_{51})$$

由於預算不足，因此第 3 條路線下年度無法進行交通安全改善。

六、結論

快速道路對都市交通擁擠具有紓解之功效，但在交通安全考量上也就益形重要，權責單位每年均需對此交通安全問題進行檢討，並編列預算加以改善。快速道路交通安全改善，諸如閃光裝置、標線與標誌之設置、路面之保養、以及其他改善事項等，均可依各路段之特性研擬不同之改善對策。根據每一評估單位之可行改善對策，即可構成各種可行之改善方案，再依預算之多寡與各評估單位公平性之考量，即可進行執行方案之評選。

傳統上交通方案之評估，大多應用成本效益分析法，利用增量進行益本比分析，以找出成效較佳之方案。由於不確定性之存在，欲詳細且明確地估計各改善對策所需之成本與可能改善之效益，確實相當困難，同時要明確地編列所需之預算，亦非易事。本文考量模糊性之特性，提出交通安全改善評估模式。在此模式中，首先應用模糊增量益本分析法進行各評估單位改善方案之評估與排序，再依公平性與預算限制之考量，選取各評估單位之執行方案。

本文所提出之方法簡單易於應用，同時符合傳統成本效益分析之精神，在實務應用上甚具實用性。本文只考慮年度預算與成本效益之估算，未

來可推廣至多年期規劃問題上，使道路交通安全問題之改善，更具連貫性與周延性。

參考文獻

- 1.秋山孝正，邵村福，內田敬，佐佐木綱，「都市高速道路交通安全對策立案へのフジィ理論の應用」，土木學會論文集，第 425 號 / IV-14，PP91-98，1991 年 1 月。
- 2.鄧振源，「相關性運輸投資計畫選擇之研究：非模糊與模糊多目標規劃方法」，國立交通大學交通運輸研究所博士論文，NO.001，民國 81 年 6 月。
- 3.賴士葆著，「工程經濟：資金分配理論」，華泰書局，台北，民國 82 年 7 月。
- 4.Buckley,J.,J.,“Ranking Alternatives Using Fuzzy Numbers,” Fuzzy Sets and Systems, Vol.15, pp21-31, 1985.
- 5.Kaufmann, A. and M. M. Gupta, Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Managements Science, Elsevier, New York, 1988.
- 6.Steiner, H. M., Engineering Economic Principles, Mc Graw-Hill, New York,1982.
- 7.White, J. A., M. H. Agee and K. E. Case, Principles of Engineering Economic Analysis, 3rd., Wiley & Sons, New York, 1989.