

混凝土橋整橋風險評估模式之研究

廖先格(Hsien-Ke Liao)

中華民國營建管理協會技術經理

蔡欣局(Hsin-Chu Tsai)

中華顧問工程司設施技術中心主任

王鶴翔(Helsin Wang)

新中光物理探測公司顧問

姚乃嘉(Nie-Jia Yau)

國立中央大學土木工程系教授

*陳致霖(Chin-Lin Chen)

國立屏東科技大學土木工程系助理教授

黎光傑(Kuang-Chieh Li)

亞泰工程顧問公司負責人

運研所計畫編號：MOTC-IOT-112-EBB005

摘要

依據交通部規範，橋梁原則上每兩年須進行一次定期檢測，即對全橋各構件之劣化程度、劣化範圍、對橋梁安全性與服務性的重要性，以及對劣化維修之急迫性，給予 1~4 之評分數值；然此評分結果係針對橋梁構件進行維修或處置之建議，並無法代表橋梁整體之狀況。本研究透過回顧美、日、南非及中國大陸之橋梁評等方式以及訪談 10 位國內專家學者，提出一整橋風險評估模式，由結構安全評等及耐洪安全評等中，較差者代表整橋風險評等；評等結果分為 I~IV 等，I 為橋況良好，IV 則為橋況嚴重。評估模式中，本研究提出結構性指標(SCI)、結構安全風險指標(RI_S)、耐洪性指標(FCI)及耐洪安全風險指標(RI_F)，透過 SCI 與 RI_S 之矩陣決定結構安全評等，透過 FCI 與 RI_F 之矩陣決定耐洪安全評等。本研究並挑選 10 座混凝土橋進行現地檢測，將檢測員依經驗所給定之評等，與整橋風險評估模式計算結果進行比較，以驗證整橋風險評估模式之正確性。

關鍵詞：橋梁檢測、風險評估、橋梁狀況指標

Research on a Whole Bridge Risk Assessment Model for Concrete Bridges

Abstract

According to the regulations of the Ministry of Transportation, bridges are generally required to undergo regular inspections every two years. These inspections assess various bridge components the degree and extent of deterioration, the importance of deterioration to bridge safety and serviceability, and the urgency of deterioration maintenance, assigning numerical ratings from 1 to 4. However, these scores are specific to recommending maintenance or disposal of individual bridge components and do not represent the overall condition of the entire bridge. In this study, a whole bridge risk assessment model is proposed by reviewing bridge rating methods used in the United

States, Japan, South Africa, and mainland China, and by interviewing ten domestic experts and scholars. In this model, the overall bridge risk rating is determined by the worst ratings among structural safety rating and flood resilience safety rating, ranging from I (excellent condition) to IV (severe condition). The assessment model includes Structural Condition Index (SCI), Structural Safety Risk Index (RIS), Flood Resilience Index (FCI), and Flood Resilience Safety Risk Index (RIF). Structural safety ratings are determined using the matrix of SCI and RIS, while flood resilience safety ratings are determined using the matrix of FCI and RIF. This study also conducted on-site inspections of ten concrete bridges, comparing the ratings given by inspectors based on their experience with the results calculated using the comprehensive bridge risk assessment model to validate the accuracy of the model.

Keywords : bridge inspection, risk assessment, bridge condition index

一、前言

我國現行「公路橋梁檢測及補強規範」[1]規定，橋梁原則上每兩年須進行一次定期檢測，採用DER&U目視檢測評估法，針對全橋各構件之「劣化程度(Degree)」、「劣化範圍(Extent)」、對橋梁安全性與服務性的「重要性(Relevancy)」以及針對劣化維修之「急迫性(Urgency)」，分別給予1~4之評分數值，數值代表之意義詳表1。然此評分結果係針對橋梁構件進行維修或處置之建議，無法代表橋梁整體之狀況，而不同構件即使有相同之U值，造成之影響未必相同，因此本研究在「公路橋梁檢測及補強規範」之架構下，利用DER&U目視檢測結果，以及「車行橋梁管理資訊系統」中橋梁之基本資料，建立一整橋風險評估模式。本研究之研究範圍及限制為：(1)僅針對車行橋梁進行研究，鐵道橋梁及人行天橋不列入；(2)僅針對混凝土橋，鋼結構橋梁不列入；(3)僅針對一般性橋梁，即梁式橋及板橋，特殊性橋梁不列入；(4)利用定期檢測紀錄及「車行橋梁管理資訊系統」中橋梁之基本資料。

表1 DER&U目視檢測評估法

評分	0	1	2	3	4
劣化程度(D)	無此項目	良好	尚可	差	嚴重損壞
劣化範圍(E)	無法檢測	10%以下	10%~30%	30%~60%	60%以上
重要性(R)	無法判定重要性	微	小	中	大
急迫性(U)	無法判定急迫性	例行養護	3年內維護 或持續追蹤	1年內維護	緊急處置

二、整橋風險評估

2.1 專家訪談

本計畫共訪談十位專家學者，受訪對象包含橋梁管理機關中直接負責橋梁管理及檢測之人員、執行橋梁檢測之顧問公司以及學術單位人員，了解橋

梁管理機關對於發展整橋風險評估模式之看法及需求，以及檢測人員對於整橋風險評估方式之建議。另外，本研究參考廖先格, 2015，利用橋梁構件重要指標(I_i)計算橋梁各構件之權重(w_i)之方式[2]，以問卷方式調查各構件之重要指數，請十位專家對各構件在整體結構安全(權重0.255)、用路人服務性(權重0.050)、修復所需時間(權重0.039)、耐震安全(權重0.273)、沖刷安全(權重0.228)及土石流安全(權重0.155)共6個因子，分別給予0~4之分數，彙整專家所填分數後，取算術平均數，再乘以因子之權重後加總得到 I_i ，詳表2。

表2 橋梁構件重要指數(I_i)

NO	構件名稱	整體結構安全	用路人服務性	修復所需時間	耐震安全	沖刷安全	土石流安全	I_i
1	引道路堤	0.255	0.145	0.082	0.164	0.182	0.140	0.968
2	引道路堤護欄	0.128	0.150	0.086	0.082	0.046	0.031	0.522
3	引道路堤保護措施	0.230	0.105	0.094	0.246	0.296	0.217	1.187
4	河道	0.408	0.050	0.121	0.218	0.752	0.419	1.968
5	護床工	0.408	0.050	0.131	0.109	0.798	0.388	1.883
6	橋台基礎	0.969	0.100	0.135	0.928	0.866	0.496	3.494
7	橋台	0.969	0.090	0.109	0.928	0.593	0.450	3.139
8	翼牆/擋土牆	0.574	0.080	0.101	0.519	0.342	0.310	1.926
9	橋梁排水設施	0.179	0.100	0.090	0.109	0.046	0.016	0.539
10	橋護欄	0.204	0.163	0.082	0.055	0.046	0.031	0.580
11	伸縮縫	0.497	0.185	0.086	0.491	0.137	0.062	1.458
12	支承/支承墊/阻尼裝置	0.663	0.068	0.119	0.928	0.160	0.109	2.046
13	防落設施	0.612	0.030	0.107	0.983	0.205	0.124	2.061
14	橋墩/橋基保護設施	0.434	0.050	0.117	0.355	0.752	0.465	2.173
15	橋墩基礎	1.020	0.105	0.156	0.983	0.889	0.512	3.665
16	橋墩/帽梁	0.995	0.110	0.127	0.983	0.570	0.450	3.234
17	橋墩側向支撐	0.714	0.070	0.107	0.901	0.365	0.248	2.405
18	主梁	0.995	0.138	0.129	0.819	0.182	0.264	2.526
19	橫隔梁	0.536	0.085	0.113	0.519	0.114	0.109	1.475
20	托梁	0.701	0.110	0.096	0.710	0.137	0.140	1.893
21	橋面板	0.931	0.168	0.113	0.737	0.137	0.140	2.225

2.2 整橋風險評估分等

本研究回顧美國[3]、日本[4]、南非[5]及中國大陸[6]之橋梁狀況分類，美國分為「良好」、「尚可」及「劣等」，以此為基準，日本在「劣等」這等級中，往下分出一類「應緊急處置」，故有I~IV共四個等級；南非及中國大陸則在「良好」這等級中，往上分出一類「狀況如新」，亦在「劣等」這等級中，往下分出一類「有立即危險」，共有五個等級。本研究認為將「劣等」中更為嚴重之情況另分一類，於實務上確有必要，故提出分為I~IV共四個等級，各等級對應之說明詳表3。

表3 整橋風險評估分等

等級	說明
I	橋梁狀況良好，若無明顯會造成嚴重危害之因素，可於檢測規範所定範圍內，適度放寬檢測頻率。
II	橋梁狀況尚可，尚未影響結構或耐洪性能。可考慮進行預防性維修。

III	橋梁狀況較差，結構或耐洪性能已受影響。建議進行適當之維修，或調高檢測頻率。
IV	橋梁狀況嚴重，對結構或耐洪性能造成嚴重影響。建議進行結構安全評估，經評估後採取適當之維修或補強，若難以有效維修或補強，或效益不高時，可考慮改建。
重要構件(例如墩柱、基礎、主梁、橋面板等)有 U=4 且尚未維修時，徑列為等級IV	

2.3 整橋風險評估模式

美國[3]與日本[4]是以橋梁主要構件中最差者為整橋評等之代表，而南非[5]及中國大陸[6]則使用公式計算出一數值指標，再依指標之分數區間進行分等，考量臺灣屬於複合性災害區域，使用單一綜合指標作為評等依據，將難以突顯橋梁之狀況，故本研究提出由「結構安全評等」及「耐洪安全評等」中取較差者代表「整橋風險評估」結果。若橋梁未跨任何水域，僅有「結構安全評等」，而無「耐洪安全評等」。

2.4 結構安全評等

本研究提出結構性指標(Structural Condition Index, SCI)及結構安全風險指標(Risk Index for Structural Safety, RIs)，使用定期檢測紀錄及橋梁管理系統中之基本資料進行評估，再透過表4之矩陣決定結構安全評等。

表4 結構安全評等矩陣

		RIs		
		低	中	高
SCI	良好($100 \geq \text{SCI} \geq 85$)	I	I	II
	中等($85 > \text{SCI} \geq 65$)	II	II	III
	嚴重($65 > \text{SCI} \geq 0$)	III	IV	IV

計算SCI時，首先使用式(1)及式(2)計算計算與結構安全高度相關構件之狀況(Component State, CS_i)，包含橋台基礎、橋台、橋墩基礎、橋墩/帽梁、橋墩側向支撐、主梁及橋面板，共7類構件，若同類型構件有複數個，則取最小值作為該類型構件之代表，最後依式(3)將7類構件之CS_i加權計算並正規化為0~100之數值，得到SCI。式(1)中之D及R為定期檢測時檢測員所評之分數(詳表1)。

$$CS_{ij} = 100 - 100 \times \frac{D \times R}{4 \times 4} \quad \text{式(1)}$$

$$CS_i = \min(CS_{ij}) \quad \text{式(2)}$$

$$SCI = \frac{\sum(CS_i \times w_i)}{\sum w_i} \quad \text{式(3)}$$

因每座橋梁存在之構件不盡相同，式(3)中之權重(w_i)並非固定值，當前述7類構件不存在或無法檢測時，便不會納入計算，使用式(4)，將存在且可檢測構件之I_i(詳表2)正規化為總和等於100，此正規化後之I_i即為w_i。

$$w_i = \frac{I_i}{\sum I_i} \times 100 \quad \text{式(4)}$$

計算時RIs，依表5所列之條件，啟動條件A1-1及A1-2均未滿足時，RIs=低；僅達A1-1之啟動條件時，視A2-1至A2-6滿足項目數，僅達A1-2之啟動條件時，視A2-3至A2-7滿足項目數，A1-1及A1-2啟動條件均達到時，視A2-1至A2-7滿足項目數，1項以下RIs=低，滿足2~3項RIs=中，4項以上RIs=高。

表5 RIs啟動條件及評估項目

NO	啟動條件	判斷方式
A1-1	橋台或橋墩基礎裸露	依定期檢測資料中橋台或橋墩基礎劣化類型
A1-2	主要構件結構裂縫或鋼筋外露	依定期檢測資料中橋台、橋墩、主梁或橋面板劣化類型
NO	評估項目	判斷方式
A2-1	基礎型式不詳(含未填)	依橋梁管理系統中橋梁基本資料
A2-2	基礎深度不詳(含未填)	依橋梁管理系統中橋梁基本資料
A2-3	墩柱與基礎嚴重劣化	依定期檢測資料中橋墩或橋墩基礎 $D \geq 3$
A2-4	第一類活動斷層近域	依 110 年「公路橋梁耐震評估與補強設計規範」表 2-2
A2-5	地盤類別為臺北盆地、第三類地盤或不詳	依橋梁管理系統中橋梁基本資料
A2-6	土壤液化潛勢為高	依橋梁管理系統中橋梁基本資料
A2-7	「碳鋼金屬腐蝕速率為 C5 或 CX」或 「離海岸 300 公尺以內」	依橋梁管理系統中橋梁基本資料

2.5 耐洪安全評等

本研究提出耐洪性指標(Flood Resistant Capacity Index, FCI)及耐洪安全風險指標(Risk Index for Flood Resistant, RIF)，使用定期檢測紀錄及橋梁管理系統中之基本資料進行評估，再透過表6之矩陣決定耐洪安全評等。

表6 耐洪安全評等矩陣

		RIF		
		低	中	高
FCI	良好($100 \geq FCI \geq 85$)	I	I	II
	中等($85 > FCI \geq 65$)	II	II	III
	嚴重($65 > FCI \geq 0$)	III	IV	IV

FCI與SCI同樣使用式(1)及式(2)計算計算與耐洪安全高度相關構件之CS_i，包含河道、護床工、橋台基礎、橋墩/橋基保護設施及橋墩基礎，共5類構件，若同類型構件有複數個，則取最小值作為該類型構件之代表，最後依式(5)將5類構件之CS_i加權計算並正規化為0~100之數值，得到FCI。

$$FCI = \frac{\sum(CS_i \times w_i)}{\sum w_i} \quad \text{式(5)}$$

w_i之計算方式同樣使用式(4)，將5類構件中存在且可檢測者之I_i正規化為總和等於100，此正規化後之I_i即為w_i。計算時RIF，依表7所列之條件，啟動條件B1-1未滿足時，RIS=低；達B1-1之啟動條件時，視B2-1至B2-9滿足項目數，滿足1項以下RIF=低，滿足2~3項RIF=中，滿足4項以上RIF=高。

表7 RIF啟動條件及評估項目

NO	啟動條件	判斷方式
B1-1	橋台或橋墩基礎裸露	依定期檢測資料中橋台或橋墩基礎之劣化類型
NO	評估項目	判斷方式

B2-1	基礎嚴重裸露	依定期檢測資料中橋台基礎或橋墩基礎 $D \geq 3$
B2-2	河道變遷	依定期檢測資料中河道之劣化類型
B2-3	鄰近有採砂	依定期檢測資料中河道之劣化類型
B2-4	基礎型式不詳(含未填)或為直接基礎	依橋梁管理系統中橋梁基本資料
B2-5	基礎深度不詳(含未填)或深度未達 10 公尺	依橋梁管理系統中橋梁基本資料
B2-6	梁底高程不足	依橋梁管理系統中橋梁基本資料
B2-7	上下游 500 公尺內是否有攔河堰	依橋梁管理系統中橋梁基本資料
B2-8	上下游 500 公尺內是否有橋梁	依橋梁管理系統中橋梁基本資料
B2-9	具側向侵蝕或水躍(或跌水)冲刷的潛在因素	依定期檢測資料中河道及護床工之劣化類型

三、結論

本研究挑選3座混凝土板橋及7座混凝土梁式橋進行現地檢測，將檢測員依經驗所給定之I~IV評等，與本研究之整橋風險評估模式計算結果進行比較(詳表8)，其中代號03、07及09之橋梁評等相差一級，造成差異之主因為檢測員與橋梁管理系統中對橋址環境之落差，例如斷層距離、金屬腐蝕速率等。未來可邀橋梁管理機關進行試辦，進一步驗證此評估模式是否合理。

表8 案例橋梁評估結果

橋梁代號	結構型式	SCI	RI _s	結構安全	FCI	RI _F	耐洪安全	整橋風險評等	檢測員評等
01	板橋	75.00	低	II	93.89	低	I	II	II
02	板橋	75.00	低	II	100.00	低	I	II	II
03	板橋	54.72	中	IV	100.00	低	I	IV	III
04	梁式橋	82.35	中	II	90.82	中	I	II	II
05	梁式橋	51.49	高	IV	83.73	中	II	IV	IV
06	梁式橋	81.03	中	II	100.00	低	I	II	II
07	梁式橋	64.66	中	III	62.50	低	II	III	IV
08	梁式橋	57.80	中	IV	100.00	低	I	IV	IV
09	梁式橋	62.77	高	IV	63.40	中	III	IV	III
10	梁式橋	81.03	低	II	100.00	低	I	II	II

四、參考文獻

- 1.交通部，「公路橋梁檢測及補強規範」，2020。
- 2.廖先格，「臺灣地區橋梁管理系統技術提升之研究」，博士論文，國立中央大學土木工程學系，2015。
- 3.Ryan, T.W., Lloyd, C.E., Pichura, M.S., Tarasovich, D.M., and Fitzgerald, S., "Bridge Inspector's Reference Manual", FHWA, 2022.
- 4.日本國土交通省，「橋梁定期點檢要領」，2019。
- 5.The South African National Roads Agency Limited, "TMH 22 Road Asset Management Manual", 2013
- 6.中華人民共和國交通運輸部，「公路橋梁技術狀況評定標準」，2011。