

淺談台灣公路橋樑伸縮縫損壞原因與預防策略

林登淵* 湯輝雄**

前言

國內近年來高、快速公路的建設，多數路段採高架工程，新建橋樑多採用長跨度或連續樑橋，因此伸縮縫型式及伸縮量不斷的創新與擴大，構造益形複雜，以致造成伸縮縫之損壞情形亦較為頻繁、顯著。

橋樑伸縮縫之維修與換裝不僅施工中交通維持困難，而且相當危險，尤其在通車壓力、車流震動以及有限空間中，要做好維修工作並不容易，同時也必須付出極高的社會成本和代價。

有鑑於此，本研究乃針對中部地區高、快速公路橋樑伸縮縫進行現況調查，並就國內機關訪查取得相關資料兩部份，以探討各路段伸縮縫使用類型、數量及損壞情形，分析各類型伸縮縫的損壞形式及相關影響因素，期能提供橋樑伸縮縫施工及維護之參考。

一、研究範圍及方法

本研究主要以中部地區之高、快速公路為調查對象，北自台 72 東西向快速公路後龍汶水線起（全線），南至台 78 台西古坑線(30k+980~42k+360)止，其中包含了台 74 線中彰快速公路（全線）、台 76 漢寶草屯線（全線）、台 61 線西濱快速公路(130k+940~179k+920)、台 63 線中投快速公路（全線）、國道 1 號高速公路(134k+880~243k+030)、國道 3 號高速公路(131k+300~268k+450)以及國道 4 號高速公路（全線）等九條路段，如圖 1.1 所示，總共里程 400 餘公里，主線橋樑伸縮縫共 2800 餘道。

研究方法分為現場現況調查及機關訪查資料兩方面，現況調查除了針對研究路線範圍內進行全面現場檢視以外，並於 93 年間只要聽聞有關於伸縮縫損壞消息或有維修或新建工程之個案施工時，即前往觀察與蒐集資料。至於機關訪查資料則親訪各工程機關（包括國工局、高公局、公路總局及住都局）、設計顧問公司（包括中華顧問、中興工程顧問、亞新工程顧問、翊盛工程顧問、榮技工程顧問）及專業廠商（包括昭林營造、祥懿營造、明德國際、毅強企業、連福橡膠、三揚產業、興道企業）等之專業工程人員，透過訪談、請益以探討伸縮縫損壞情形及影響因素，並蒐集相關損壞、修復案例，據以分析其損壞形式及相關影響因素。

* 交通部公路總局東西向快速公路中區工程處 工程司

** 交通部公路總局東西向快速公路中區工程處 處長



圖1.1 中部地區高（快）速公路橋樑伸縮縫調查路線圖

二、高、快速公路常用伸縮縫型式介紹

爲了增進行車舒適，近年來新建橋樑工程有趨向減少伸縮縫數量，採用長跨度或連續樑橋的趨勢，相對於早期所使用小伸縮量之伸縮縫型式，構造上有很大的差異。本節將就目前中部地區高、快速公路所使用伸縮縫型式進行詳細介紹。

國工局公路橋樑伸縮縫構造型式標準圖，在 85 年 1 月第二次修訂版中，取消角鋼與橡膠伸縮縫，因此二高後續計畫橋樑伸縮縫主要為齒型和模組型兩種型式。而公路總局與住都局（中彰、中投快速公路為住都局承辦）對於橋樑伸縮縫則無標準型式之規定，所以快速公路所採用之伸縮縫裝置比較多樣化（其中仍保有部份橡膠伸縮縫），調查路段中使用型式有下列五種，各種型式伸縮縫之特性分述如后【許瑞麟，2004】。

2.1 角鋼伸縮縫

角鋼伸縮縫係於相鄰橋面版端部之上側各以角鋼加強，角鋼背面焊以錨碇鋼材，埋置於無收縮混凝土中，此種伸縮縫主要在於防止角隅之混凝土受車輛衝擊作用而崩裂如圖 2.1 所示。伸縮縫間隙內為中空，或於下方以銅片封住再灌注柏油，或於下方加設橡膠片，以達防水及防止柏油流漏之效。此類型之伸縮縫適用於最大伸縮量可達五公分左右。

此型式伸縮縫在國內橋樑施工初期應用普遍，主要原因在於構造簡單、施工容易、成本低廉及養護容易，經改良加強上覆 AC 磨耗層效果甚佳。惟因時代變遷，生活機能提昇，各類型橋面伸縮縫陸續引進國內，為提昇行車品質，此型式之伸縮縫已甚少採用，惟部分短跨版橋及偏遠且車流量較少地區之單跨橋樑仍可見其蹤跡。



圖2.1 角鋼伸縮縫



圖2.2 GAI-TOP伸縮縫

2.2 GAI-TOP 伸縮縫

GAI-TOP 伸縮縫係以波浪狀鋼板豎立於相鄰橋面版端部兩側，鋼板背面焊有錨碇鋼材，埋置於無收縮混凝土中，並利用波浪狀鋼板間所形成齒型空隙做為伸縮縫，空隙內再予填縫劑處理，增進行車舒適，適用於伸縮量 5~15 公分之伸縮縫如圖 2.2 所示。其型式介於齒型與橡膠填縫伸縮縫之間，藉接縫兩端垂直波浪齒型構造保護橋面版端混凝土，及維護行車之平順。

GAI-TOP 伸縮縫在使用性能上行車舒適感較佳，且維護容易，惟在安裝施工時應特別注意錨碇佈置與方式、澆置混凝土之搗實與修整，以及橡膠材充填黏合，以避免波浪狀鋼板鬆脫、混凝土產生裂紋及橡膠材脫落等損壞問題。

2.3 SHO-BOND 橡膠伸縮縫

由於橡膠的不可壓縮性，伸縮裝置縮短時，為防止它的向上隆起，必須設置足夠大的伸縮用槽，伸縮裝置的伸縮依靠橡膠剪切與拉壓變形來提供。其主要構造為橡膠底面與縫結合處用膠粘材料粘結，利用嵌合部使縫間相連接及作防水處理。而橡膠與螺栓接合孔則灌注防蝕劑，

並且用蓋帽蓋住，防止螺帽與螺栓的鬆脫與銹蝕如圖 2.3 所示。安裝時如果環境溫度高於平均溫度，可以預先壓縮其伸長量，以便在最大間隙時，橡膠板不超過設計拉力。

橡膠板伸縮裝置以鋼鈑做骨架，結構簡單，防水性能良好，施工後接縫平整，有優良的吸振作用和變形適應性，對於車輛行駛性良好。施工安裝及調換方便，在正常行駛的情況下，該種伸縮裝置的兩端所作用的水平衝擊力比較小，因此在主樑端部只要預留較小的空間和鋼筋，安裝或更換均比較容易，螺栓連接處是薄弱環節，栓接損壞是常發生的現象。由於超出預期伸縮量而產生螺栓受力過大、安裝不良或螺帽、螺栓的銹蝕都是導致損壞的原因，其耐久性比不上鋼齒型伸縮縫。



圖2.3 SHO-BOND 橡膠伸縮縫

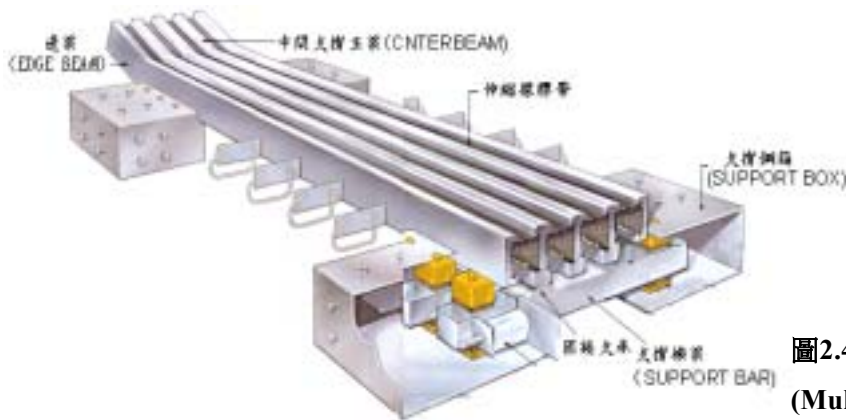


圖2.4 複式模組型伸縮縫
(Multiple Modular Expansion Joint)

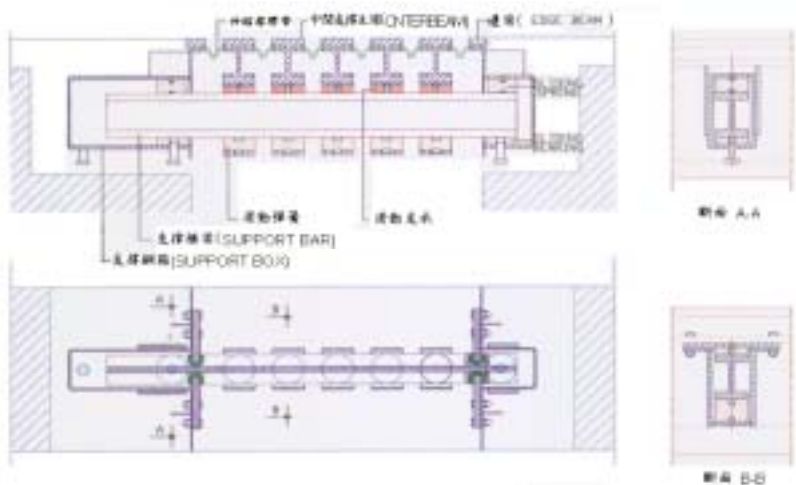


圖2.5 單式模組型伸縮縫
(Single Modular Expansion Joint)

2.4 模組型伸縮縫(Modular Expansion Joint)

模組型伸縮縫適用於連續橋樑跨距長、伸縮縫量大且複雜之大型橋樑結構，具有良好之伸縮性、止水性、可維修性與維持行車平順，在施工、使用及養護得宜下尚兼具耐久性。

模組型伸縮縫主要結構有傳遞支承組件及等距調節組件兩大部分，傳遞支承組件由中間支撐樑(Center Beam)、邊樑(Edge Beam)、支撐橫樑(Support Bar)、U 型箍筋(Stirrup)、上下承座(Bearing)及支撐鋼箱(Support Box)等組成如圖 2.4 所示，為車輛輪載重由上而下傳遞受力的主要構件。等距調節組件採彈性阻尼控制系統，由彈簧(Spring)、壓縮式彈性橡膠(Elastomeric)及連接桿組件串組於中間支撐樑間，形成一控制等距之橫樑，伸縮機制經由鋼軌與鋼軌間具壓縮性之合成橡膠作用吸收水平力，並藉由彈簧使各單元間均勻伸縮。

模組型伸縮縫型式一般分為單式及複式之模組型伸縮縫，複式模組型伸縮縫特點為每個支撐橫樑僅支撐一個中間支撐主樑，支撐橫樑與中間支撐主樑間採固接方式。單式模組型伸縮縫特點為支撐橫樑支撐所有的中間支撐主樑如圖 2.5 所示，支撐橫樑與中間支撐主樑間採鋼軛和橡膠彈簧組成之承座方式，另單式模組型伸縮縫亦包括有支撐橫樑採欄柵式系統，主要為利於間隔伸縮及支撐鋼箱內滑動。

2.5 齒型伸縮縫

齒型伸縮縫一般分類為豎齒型及鋸齒型伸縮縫如圖 2.6 及圖 2.7 所示，主結構為兩片豎齒或鋸齒狀之鋼鈑，其凹凸鋼鈑相互交錯，藉由鋼鈑交錯間隙伸縮，不致相擠壓，並可維持行車平順。其下設有排水槽以排除橋面逕流水，側邊焊接錨碇鋼板或鋼筋，由於構件主要以鋼材組成，組件單純，材料單價相對低廉。最常設於 1~3 跨數之橋樑，近年來由於鋼製品焊接技術提昇與設計技巧不斷演進，亦逐漸應用到 200 餘公尺之多跨橋樑，由於工廠製造後，安裝、養護容易，管理單位與用路人長久以來接受度較高，目前此類型橋面伸縮縫應用仍甚為普遍。

國內製造齒型鋼鈑伸縮縫產品一般在 5 公分至 25 公分間，惟為因應長橋需求，目前已有生產伸縮量達 48 公分之豎齒型鋼鈑伸縮縫。歐美國家更已製造伸縮量達 70 公分之巨型豎齒型伸縮縫，已趨具備因應長橋需求之伸縮功能考量設計。



圖2.6 豎齒型伸縮縫



圖2.7 齒型伸縮縫

三、伸縮縫現況調查情形與機關訪查資料分析

3.1 現況調查

本研究現況調查係作者自 93 年 7 月 29 日至 93 年 8 月 8 日親赴調查路段就每一道伸縮縫進行檢視、拍照、並紀錄所在里程位置，對於有損壞部份則加拍特寫俾利研究；茲將現況調查作業之時間與調查路段里程明列如表 3.1 所示。

橋樑伸縮縫現況調查統計之數量係以單向車道之數量乘以 2 計算如表 3.2 所示，橋台與橋墩錨碇混凝土裂縫數量則以單向車道之數量計算如表 3.4 所示。由於現場調查受限於橋樑檢查車輛、機具，無法進行伸縮縫底部觀察，僅能統計各類型數量，並就表面損壞情形加以分析。又因高速公路行車速度快、流量大，調查作業十分危險，因此檢視與拍照部份僅以單向車道為之，對向車道則紀錄使用型式，故數量之計算為雙向車道，而錨碇混凝土裂縫數量統計則以實際檢視、拍照者進行分析計算。

表 3.1 橋樑伸縮縫現況調查作業之時間與調查路段明細表

日 期	路 線	行駛方向	里 程	交流道區間	公里數
93.07.29	台72線	東行線	17k+295～19k+650	龜山～中興	2.35
		西行線	19k+800～7k+750	中興～北勢溪	12.05
93.07.30	國道3號	南下	183k+470～224k+030	龍井～南投	40.56
93.08.01	台 63 線	北上	10k+230～2k+010	烏溪～台中	8.22
		南下	6k+880～17k+370	國道3～終點	10.49
93.08.01	台 76 線	西行線	25k+820～10k+950	林厝～福興	14.87
		東行線	11k+090～26k+120	福興～林厝	15.03
93.08.02	台 72 線	東行線	5k+550～25k+910	後龍～河排	20.36
		西行線	25k+910～5k+550	河排～後龍	20.36
93.08.02	國道 1 號	南下	134k+880～191k+750	苗栗～王田	56.87
93.08.04	台74線	北上	0k+000～14k+595	全線	14.60
93.08.04	國道4號	東行線	12k+790～17k+490， 1k+030～2k+920	國道1～終點 起點～國道3	6.59
		西行線	17k+490～1k+030	全線	16.46
93.08.04	國道3號	北上	168k+430～131k+300	國道4～後龍	37.13
		南下	168k+720～183k+290	國道4～龍井	14.57
93.08.06	國道3號	南下	224k+590～268k+450	南投～台78線	43.86
93.08.06	台78線	西行線	42k+360～30k+980	國道3～國道1	11.38
93.08.06	國道1號	北上	243k+030～194k+660	台78線～王田	48.37
93.08.08	台61線	北上	179k+790～130k+940	鹿港～苑裡	48.85
		南下	175k+170～179k+920	鹿港段	4.75
		合 計			447.72

3.1.1 各類型伸縮縫使用情形

各路線伸縮縫使用型式數量調查結果如表 3.2 所示，其中以齒型 896 道為最多，其次則為模組型有 815 道。根據上述調查結果顯示，高速公路橋梁使用最多的伸縮縫裝置為模組型伸縮縫有 558 道，其次是齒型伸縮縫有 554 道；而快速公路（包括東西向、西濱、中投、中彰快速公路）使用最多的則是 SHO-BOND 橡膠伸縮縫有 436 道，其次是齒型伸縮縫有 374 道，再其次為模組型伸縮縫有 257 道，中投、中彰快速公路則以角鋼型伸縮縫使用最多。

3.1.2 現況損壞情形分析

由於橡膠伸縮縫使用壽命較短，調查發現現場損壞情況嚴重，檢視損壞情形為橡膠蓋套脫落螺栓孔拉裂如圖 3.1 所示，以及損壞情況更明顯嚴重者如圖 3.2 所示，經統計西濱快速公路部份：調查數量 174 道，損壞數量 72 道，損壞率 $72/174=41.38\%$ （以下計算方式以此類推）。其中橡膠嚴重脫落者有 26 道，佔調查數量的比例為 14.94%（11 道已更換為齒型），詳表 3.3 所示。

有關橋台與橋墩錨碇混凝土裂縫損壞判定準則，以目視有明顯裂縫者即予計列如圖 3.3 所示，更明顯嚴重者如圖 3.4 所示。經統計結果各路線損壞發生率如表 3.4 所示。

其中西濱快裂縫發生率為 41%及東西快台 78 線發生率為 38.23%，均較平均發生率 63.35% 為低，究其原因為這兩路段較其他路線完成較晚，開放通車時間較短，因此損壞率目前較低。

表 3.2 中部地區高（快）速公路橋樑伸縮縫現況調查統計表

路線 型式	國道 1 號	國道 3 號	國道 4 號	西濱快 速公路	中彰快 速公路	中投快 速公路	後龍 汶水線	漢寶 草屯線	台西 古坑線	小計
齒型	196	282	44	162	12	19	115	8	58	896
豎齒型		32								32
角鋼	214				52	138				404
鋁角鋼		30			96					126
SHO BOND				348			88			436
GAi TOP	22			10	54	4		24		114
模組型 2 單元		40	10	44		34				128
模組型 3 單元		84	46	8			13	41	4	196
模組型 4 單元		186	20				18	30		254
模組型 5 單元		76	18				12	25		131
模組型 6 單元		70					6	16		92
模組型 7 單元		6								6
模組型 8 單元		2					2			4
模組型 10 單元							4			4
模組型小計		464	94	52		34	55	112	4	815
合計	432	808	138	572	214	195	258	144	62	2823

表 3.3 西濱快速公路橡膠伸縮縫損壞數量統計表

項 目	調查數量(道)	損壞數量(道)			備 註
		損壞嚴重	損壞較輕微	合計	
台 61 線	174	26	46	72	表 3.2 之 348=174*2
損壞比例(%)		14.94	26.44	41.38	

3.2 機關訪查資料分析

由於現場調查有其實際困難，因此透過機關主辦人員訪查，取得相關調查報告資料，進行分析。

3.2.1 國道 3 號中部路段部份

國道 3 號中部路段（自大甲至南投路段）伸縮縫使用數量及損壞率統計如表 3.5 所示。其損壞形式主要為：鋼梁斷裂、混凝土破裂錨碇構件斷裂、伸縮橡膠破裂、橡膠支承墊脫離而產生噪音與鋼梁震動跳動、鋼樑彎曲變形等。

表 3.4 橋台與橋墩無收縮錨碇混凝土龜裂數量統計表

路線名稱	調查伸縮縫數	橋台處伸縮縫			橋墩處伸縮縫		
		橋台伸縮縫數	混凝土龜裂數	龜裂比例 (%)	橋墩伸縮縫數	混凝土龜裂數	龜裂比例 (%)
國道 1 號	216	134	93	69.4	82	7	8.54
國道 3 號	404	176	115	65.34	228	6	2.63
國道 4 號	68	8	5	62.5	60	0	0
西濱快速公路	306	22	9	41.0	284	18	6.33
東西快台 72 線	208	18	12	66.7	190	7	3.68
東西快台 78 線	42	34	13	38.23	8	0	0
中彰快速公路	111	6	4	66.7	105	6	5.71
中投快速公路	115	14	10	71.4	101	6	5.94
合計	1470	412	261	63.35	1058	50	4.73



圖3.1 SHO-BOND橡膠蓋套脫落螺栓孔拉裂 (損壞較輕微者)



圖3.2 SHO-BOND橡膠破裂脫落(損壞嚴重者)



圖3.3 錨碇混凝土裂縫較輕微者



圖3.4 錨碇混凝土裂縫較嚴重者

3.2.2 省道快速公路部份

公路總局轄管東西向及西濱快速公路模組型伸縮縫損壞情形調查統計如表 3.6 所示，總計

省道快速公路部份模組型伸縮縫總數 480 道，損壞 29 道，平均損壞率為 6.04%。損壞成因主要為：鋼軌斷裂、鋼箱內墊片鬆動、遭重車撞擊造成斷裂破壞、支撐橫梁鋼箱座下方之無收縮混凝土未完全填滿，致造成承壓破壞。

另外齒型伸縮縫損壞情形調查統計如表 3.7 所示，損壞成因主要為錨碇構件斷裂致使齒鉸斷裂跳脫、錨碇失敗使齒鉸翻轉翹起。

3.2.3 國道 1 號中山高部份

由文獻資料「高速公路橋面伸縮接縫設計與施工之研究」【高速公路局，1982】得知，早期中山高速公路橋面伸縮縫損壞情形統計結果如表 3.8 所示，各類橡膠型伸縮縫損壞率：WABOFLEX 型為 20.41%；TRANSFLEX 型為 65.93%；W 型更高達 93.1%；角鋼型伸縮縫損壞率為 17.98%，而鋸齒型損壞率為則 8.06%。

表 3.5 國道 3 號中部路段伸縮縫使用數量及損壞率統計表

路段名稱	模組型(道)			豎齒型(道)			齒型(道)			小計		
	伸縮縫數	損壞道數	損壞率%	伸縮縫數	損壞道數	損壞率%	伸縮縫數	損壞道數	損壞率%	伸縮縫數	損壞道數	損壞率%
大甲路段	101	5	4.95		0	0	96	0	0	197	5	2.54
台中環線	144	39	27.08	0	0	0	38	1	4.17	182	40	21.98
大甲彰濱段	66	0	0.00	0	0	0	96	0	0	162	0	0
彰濱快官段	140	1	0.71	85	0	0	15	0	0	245	1	0.41
快官草屯段	103	1	0.97	0	0	0	34	0	0	137	1	0.73
南投路段	115	3	2.61	0	0	0	127	9	7.09	242	12	4.96
合計	669	49	7.32	85	0	0	406	10	2.46	1165	59	5.06

表 3.6 東西向及西濱快速公路模組型伸縮縫損壞情形調查表

路線別	伸縮縫總數(道)	損壞數量(道)	損壞比率(%)
台 61 線	120	0	0
台 72 線	34	2	5.89%
台 76 線	126	15	11.9%
台 78 線	28	0	0
台 88 線	172	12	6.98%
合計	480	29	6.04%

表 3.7 東西向及西濱快速公路齒型伸縮縫損壞情形調查表

路線別	調查數量	損壞數量	損壞比率%
台 61 線	162	3	1.85
台 72 線	115	1	0.9%
台 76 線	8	0	0
台 78 線	58	0	0
合計	357	4	1.12%

表 3.8 早期中山高橋面伸縮縫損壞統計表

型 式	橡 膠 型			角鋼型	鋸齒型
	W型	TRANSFLEX 型	WABOFLEX 型		
伸縮縫道數	58	226	98	734	273
損壞道數	54	149	20	132	22
損壞率 (%)	93.1%	65.93%	20.41%	17.98%	8.06%

本表為 70 年 9 月底之調查資料，未包括修後再損壞之數量。

綜上機關訪查資料分析比較模組型與齒型伸縮縫損壞率詳如表 3.9 所示，模組型之損壞率平均約為齒型之 3.7 倍($6.68/1.79=3.73$)。

表 3.9 模組型與齒型伸縮縫損壞率比較表

項 目	模組型伸縮縫	齒型伸縮縫
高速公路部份損壞率	7.32%	2.46%
快速公路部份損壞率	6.04%	1.12%
平 均	6.68%	1.79%

3.3 現況調查情形與機關訪查資料分析結語

由以上各項調查資料彙整分析結果如下：

1. 由現況調查中部地區高、快速公路橋樑伸縮縫使用類型以齒型有 896 道為最多，其次為模組型有 815 道。
2. 由現況調查中部地區高、快速公路橋樑伸縮縫無收縮錨碇混凝土龜裂情形，橋台處發生率平均為 63.35%；橋墩處發生率平均為 4.73%。
3. 由機關訪查資料可得各類型伸縮縫損壞率：(1).國道高速公路中部路段部份：模組型損壞率平均為 7.32%；齒型損壞率平均為 2.46%。(2).省道快速公路部份：模組型損壞率平均為 6.04%；齒型損壞率平均為 1.12%；SHO-BOND 型橡膠伸縮縫損壞率為 41.38%。(3).早期中山高橋面伸縮縫：橡膠伸縮縫損壞率分別為 WABOFLEX 型 20.41%；TRANSFLEX 型 65.93%；W型 93.1%；角鋼型損壞率為 17.98%，而齒型損壞率則為 8.06%。以上依據各路線比較結果皆以齒型伸縮縫之損壞率為最低。由前述第(1)、(2)點分析可得齒型伸縮縫之損壞率無論在高速公路或快速公路均明顯低於模組型伸縮縫；第(3)點分析可得中山高速公路橋面伸縮縫之型式現今已較少採用，而其損壞率亦以齒型伸縮縫為最低。

四、伸縮縫損壞形式與相關影響因素

本節延續現況調查與機關訪查分析之資料，彙整歸納伸縮縫損壞形式輔以照片說明，並探討因設計、材料與施工不當造成伸縮縫損壞之相關影響因素。

4.1 橋樑伸縮縫的損壞形式

茲將本研究路段橋樑伸縮縫所產生之實際破壞形式，依其不同材料結構型式分述如后。

4.1.1 橡膠伸縮裝置

橡膠伸縮縫之破壞形式有：

1. 兩側錨碇混凝土嚴重開裂破碎、出現坑洞，進而引起橡膠板脫落，如圖 4.1 所示。
2. 固定橡膠板的螺栓銹蝕失去作用或被車輪衝擊剪斷，橡膠板撕裂脫離，如圖 4.2 所示。
3. 錨固構件鬆動，橡膠連接部位破裂，橡膠被拉斷脫落，如圖 4.3 所示。
4. 橡膠板被拉斷，填充料被拉離，如圖 4.4 所示。
5. 橡膠板破裂剝離、預埋鋼板外露，如圖 4.5 所示。
6. 板式橡膠伸縮縫螺栓蓋套脫落、橡膠老化、損傷破壞，如圖 4.6 所示。

4.1.2 鋼製型伸縮裝置

鋼製型伸縮裝置，包括角鋼、齒型和豎齒型，出現破壞的形式有：

1. 錨碇混凝土破裂，角鋼伸縮縫角鋼斷裂，錨碇鋼筋斷裂脫落，如圖 4.7、4.8 所示。
2. 豎齒型伸縮縫錨碇構件斷裂齒鋼板陷落，如圖 4.9、4.10 所示。
3. 齒型指板伸縮縫錨碇螺栓剪斷，指板脫落，如圖 4.11 所示。
4. 齒型伸縮縫進橋版錨碇端下陷，造成齒板轉動翹起，如圖 4.12 所示。
5. 齒型伸縮縫鋼板及錨碇構件斷裂脫落，鋼板在焊接處斷裂，如圖 4.13 所示。
6. 齒型伸縮縫間積滿砂土石塊使鋸齒間隙卡住，影響伸縮及排水功能，如圖 4.14 所示。



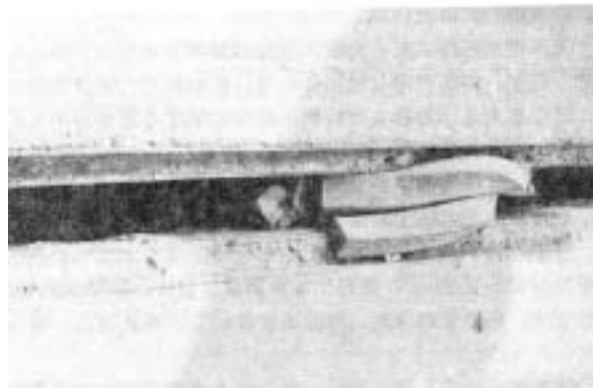
圖4.1 錨碇混凝土開裂破碎橡膠板脫落



圖4.2 螺栓銹蝕或剪斷橡膠板撕裂脫離



圖4.3 錨固件鬆動橡膠被拉斷破裂脫落圖



4.4 填充料被拉離



圖4.5 橡膠板剝離、預埋鋼板外露



圖4.6 板式橡膠伸縮縫螺栓蓋脫落

4.1.3 模組型伸縮縫

模組型伸縮縫損壞形式有：

1. 支承系統滑動墊塊磨損或脫落使鋼梁承受過大反復荷重疲勞而斷裂，如圖 4.15、4.16 所示。
2. 控制系統鋼梁焊接處開裂致使伸縮縫鋼梁下陷，如圖 4.17~4.19 所示。
3. 鋼支承箱底部混凝土澆置不實，造成支承箱鬆動，將因振動過大而使伸縮縫破壞，如圖 4.20 所示。
4. 鋼支承箱支承點未座落在混凝土托座上，鋼支承箱懸空，荷載後箱體開裂，滑動墊塊跳脫進而使鋼梁斷裂，如圖 4.21 所示。
5. 等距彈簧失效軸承桿頂住鋼板而撐開，造成邊樑縫距異常，橡膠脫落，如圖 4.22、4.23 所示。
6. 模組型伸縮縫模縫中填滿砂土，影響伸縮縫正常伸縮功能，如圖 4.24 所示。
7. 錨碇混凝土破壞因修復後過早開放通車，以致修補之混凝土再度破碎，鋼梁亦隨之再次斷裂，如圖 4.25、4.26 所示。
8. 錨碇混凝土破裂，錨碇桿件隨之斷裂進而造成鋼梁斷裂，鋼梁表面以鋼板局部焊接覆蓋修補，但混凝土破裂卻持續延伸擴大，如圖 4.27、4.28 所示。
9. 錨碇混凝土受撞擊碎裂，伸縮縫邊樑彎曲變形，伸縮縫本體扭曲或軌間高差過大，致局部構件承受集中荷重，使中間支撐樑或支撐橫樑因而加速疲勞及剪斷破壞，如圖 4.29 所示。
10. 填縫橡膠破裂脫落，如圖 4.30 所示。
11. 等距伸縮彈簧老化損壞，如圖 4.31 所示。
12. 支承墊塊磨損，如圖 4.32 所示。

4.2 伸縮縫損壞之相關影響因素

依據前節所述之伸縮縫損壞形式可發現是由許多不利因素累積所造成，包括材料、製造、設計、施工、養護維修以及外在環境條件、行車速度、車輛荷載等，本節再就其損壞形式分別以設計、材料、施工與管理維護等方面逐一分析說明導致前一節所述各種損壞形式之影響因素。



圖4.7 錨碇混凝土破裂伸縮縫鋼梁斷裂



圖4.8 錨碇剪力釘斷裂脫落



圖4.9 豎齒型伸縮縫錨碇鐵件斷裂齒鋼板陷落



圖4.10 順車行方向前側伸縮縫陷落對行車造成嚴重威脅

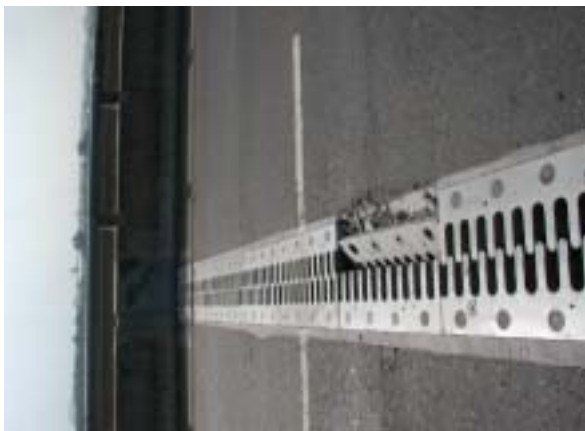


圖4.11 指板伸縮縫脫落



圖4.12 齒型伸縮縫進橋側翹起



圖4.13 齒型伸縮縫鋼鈑及錨碇構件斷裂脫落
鋼鈑在焊接處斷裂圖



4.14 齒型縫間積滿砂土影響伸縮功能



圖4.15 伸縮縫中間鋼梁斷裂



圖4.16 錨碇混凝土破壞致使邊樑斷裂



圖4.17 滑動控制系統鋼梁焊接處開裂



圖4.18 支承墊脫落致使鋼梁下陷



圖4.19 鋼梁焊接開裂或支承墊脫落均會造成中間鋼梁下陷



圖4.20 鋼箱底部澆置不實將因振動過大而使伸縮縫破壞



圖4.21 安裝位置不當致鋼支承箱懸空



圖4.22 邊樑縫距異常橡膠脫落



圖4.23 等距彈簧軸承桿頂住鋼板造成縫距不均



圖4.24 模組型縫中填滿砂土影響正常伸縮



圖4.25 錨碇混凝土修補後再次破裂進而造成鋼梁斷裂



圖4.26 鋼梁斷裂損壞情形



圖4.27 鋼梁斷裂以鋼板焊接修補



圖4.28 以鋼板焊接修補但仍持續開裂



圖4.29 無收縮混凝土受撞擊破裂、伸縮縫邊樑彎曲



圖4.30 橡膠破裂脫落



圖4.31 等距伸縮彈簧損壞



圖4.32 滑動墊塊磨損

4.2.1 設計方面的影響因素

伸縮縫損壞之基本原因在設計階段即已發生，如對橋樑面版端勁度考慮不周、伸縮縫裝置本身勁度不夠、錨固件強度不足，過大的伸縮縫間距或伸縮量計算錯誤等都會導致伸縮縫損傷破壞；有關前一節所提及損壞形式中，有一部份係因在設計方面未符合需求所引起的，其損壞影響因素歸納如下列五點：

1. 伸縮縫在整個橋梁工程所佔的份量不多，一般易被設計人員忽視，因而未對伸縮縫進行周詳的考慮與設計。
2. 有些設計工程師在伸縮縫設計過程中只注重計算橋梁的伸縮量，而對伸縮裝置的性能沒有全面了解，忽視了產品相應技術的要求。
3. 設計上未對伸縮縫兩側的錨碇混凝土和鋪裝層材料選擇、配合比、密實度和強度提出嚴格要求或規定；對於梁端部伸縮縫基座之基本需求未加以考量規範，任由廠商依採用廠牌型式自行設計。
4. 有些橋梁結構，橋面版剛度不足，當橋面版受到汽車荷載作用時，因翼版較薄，橫向聯繫較弱，導致橋面版變形過大。
5. 施工說明中規定伸縮縫錨碇如採焊接施工，預留鋼筋須使用可焊鋼筋，但設計圖中常未明白標示，以致現場施工未特別留意而以一般鋼筋配置，影響焊接與錨碇之品質。

4.2.2 材料方面的影響因素

伸縮縫損壞形式之另一項影響因素為材料自然老化、任意修改零件尺寸、組裝加工間距誤差、製造構件長度偏差、構件焊接不良或位置偏差等，有關材料方面所引起的損壞影響因素則歸納如下七點：

1. 伸縮裝置材料如橡膠或填縫劑材質老化、斷裂。
2. 伸縮縫製作時，零組件安裝未盡確實，以致承受反覆載重後零組件鬆脫。
3. 伸縮縫成品在運輸過程或儲存不當，導致產生變形或零組件鬆脫、掉落。
4. 橡膠伸縮縫之材質性能，加勁鋼板的配置，鋼板與橡膠粘接強度以及生產時的溫度和濕度的控制不當。

5. 新舊混凝土交界面接著劑材料使用不當，降低其黏結效果。
6. 錨固構件之焊接品質不良造成電焊處斷裂，或焊接不當使應力無法傳遞。
7. 有些模組型伸縮縫用的鋼梁採用鋼鉚或型鋼焊接組合而成，整體性較差。另有些廠牌採用壓條和螺栓鎖定密封橡膠帶，扣件容易銹蝕斷裂，造成橡膠帶脫落。

4.2.3 施工方面的影響因素

除了設計及材料方面的影響因素外，現場施工安裝不完善亦是損壞影響因素的重要原因，茲將其分別以前置作業之施工、安裝、補強鋼筋綁紮與環氧樹脂塗佈及無收縮混凝土澆置等五方面加以探討如下：

4.2.3.1 前置作業施工問題

1. 預留槽回填材料未確實鋪平、夯實，經車輛碾壓後凹陷不平，AC 切割面位於凹線上，或 AC 鋪設時橫向平整度不佳，導致伸縮縫安裝無法與 AC 面層平順，增加行車衝擊荷重，縮短其使用壽命，如圖 4.33~4.35 所示。
2. 預留槽兩端梁之間空隙鋪設底板材料不夠堅固及回填料不佳又未確實夯實，當重車經過，底板材料破裂、回填料流失，或覆蓋鋼鉚長度不足壓陷 AC 面層，損及兩端 AC 面層切割面之平整，如圖 4.36、4.37 所示。
3. AC 鋪設自伸縮縫位置開始如圖 4.38 所示，預留槽回填鋪平再鋪設 AC 之目的乃在於取其連續鋪設之平坦度，一旦分開鋪設必有接縫，且人工整修難以達到平整之要求，這是一項嚴重錯誤的施工方式。
4. 相鄰兩橋面版或梁端間距沒有按設計要求完成，間距設置過大將使支承系統支承點裸空，設置太小則伸縮空間不足，當夏季氣溫升高橋樑伸長將使梁端碰撞而破壞，如圖 4.39、4.40 所示。
5. 預留槽尺寸不足，伸縮縫無法安裝而將錨碇桿件扳彎，安裝後無收縮混凝土寬度不夠，影響錨固強度，如圖 4.41 所示。
6. 預留槽深度不足，伸縮縫支承鋼箱底部貼近混凝土基座面，導致無收縮混凝土無法填滿或因厚度太薄強度不足，承受反復載重後破碎，使支承系統鬆動終至破壞，如圖 4.42 所示。
7. 橋面版端模處理不善，使混凝土流入槽內未即時清除，硬化後打除困難；而承包商與伸縮縫專業廠商對於界面間之責任未明確劃分，互相推諉，最終常不予清理，以致影響伸縮縫安裝及鋼筋綁紮施工，如圖 4.43 所示。
8. 鋼筋預留多又雜，橋面版端模處理不善，使橋面版混凝土內部遺留諸多孔洞，當無收縮混凝土澆置時若未加強搗實填滿孔洞，將影響錨固強度，如圖 4.44 所示。
9. 預留槽兩側混凝土浮動泥塊、鬆動之砂石、蜂窩或鐵網未清理徹底，回填砂土沖洗不乾淨，槽底留有浮渣，使新舊混凝土界面粘結不良，終將導致界面上之破損，如圖 4.45、4.46 所示。

4.2.3.2 伸縮縫安裝問題

1. 由於預留槽回填材料不良或施工欠周延，使伸縮縫周邊 AC 面層鋪設常有不平整情形，以致伸縮縫安裝無法與 AC 面平整，如圖 4.47~4.49 所示。
2. 伸縮縫安裝沒有完全調整平順如圖 4.50 所示，施工人員常以車道線以外不行駛車輛為由，對於伸縮縫兩端車道線以外部分安裝調整草率行之。
3. 預留槽位置不符或伸縮縫安裝偏一邊，鋼箱支承點未坐落在混凝土底座上，使鋼支承桿件電

焊開裂破壞，如圖 4.51~4.53 所示。

4. 伸縮縫出廠之縫距，通常以假設工地安裝時之溫度以予焊接固定，造成現場安裝時很難調整初始位移量，因此實際安裝時，施工人員很少有依當時溫度調整適當之縫距者，如圖 4.54 所示。
5. 橋台位置之齒型伸縮縫，排水槽兩側之「垂直鈑」應與橋台背牆前緣切齊，一般預留槽及安裝施工常誤將伸縮縫中心對準槽縫中心，往往造成進橋版側之錨碇混凝土寬度不足，影響錨碇強度，如圖 4.55 所示。
6. 在有縱坡度之橋面安裝伸縮縫，未依其縱坡度調整而將伸縮縫作成水平，以致伸縮縫與兩側橋面不平整，此項缺失常發生在先裝法。
7. 伸縮縫安裝太高或太低，如圖 5.56 所示，當車輛經過時均會增加其衝擊震動力，反覆作用下縮短使用年限。
8. 伸縮縫各單元間安裝前通常以角鋼鉚接或其他方式整組固定（一般稱為假固定），安裝定位與橋面版預留鋼筋焊接永久固定後，未將假固定鬆開，以致橋樑受溫度變化活動時無法即時發揮伸縮功能，造成焊接部被拉裂破壞，影響安裝定位之正確性。

4.2.3.3 補強鋼筋綁紮與環氧樹脂塗佈問題

1. 橋面版施工時遺漏預埋錨固鋼筋，或施工時伸縮裝置的錨固鋼筋焊接不夠牢固。
2. 橋面版或橋台鋼筋未伸入伸縮縫錨碇環筋內使與之結合為一體，車行日久後伸縮縫鬆動。
3. 伸縮縫施工時，將預留錨碇鋼筋燒斷或未依施工計畫配置補強筋，致錨碇力不足。
4. 預留鋼筋太多太密集，混凝土澆置搗實不足致產生蜂窩，影響錨碇強度。
5. 伸縮量較大之模組型伸縮縫，長鋼箱側之預留寬度甚大，直接把補強鋼筋箍筋加寬、橫向鋼筋分散，屬於橋面版部份配筋並未增加，形成橋版端部之脆弱，如圖 4.57 所示。
6. 伸縮縫預留槽寬度或深度不足或不平均，箍筋未配合實際尺寸加工彎紮，形成補強鋼筋歪七扭八或傾斜綁紮之情形，喪失補強筋之功能，如圖 4.58、4.59 所示。
7. 以保麗龍板隔離伸縮縫底下之間繫，保麗龍板未裁切適當而將預埋鋼筋包裹住，沒有保護層；另外保麗龍板不易固定，灌注混凝土時容易浮動，施工時須格外注意，如圖 4.60 所示。
8. 伸縮縫澆置混凝土前與原有混凝土接合面，未塗刷環氧樹脂接著劑或採用非新舊混凝土界面接著之環氧樹脂，或環氧樹脂未依規定比例調配，致澆置混凝土後接合面產生裂縫，如圖 4.61 所示。

4.2.3.4 無收縮混凝土澆置施工問題

1. 伸縮縫兩側錨碇混凝土水泥用量較大，混凝土乾縮表面易出現裂縫，應及時養護避免裂縫發生。
2. 伸縮縫混凝土澆置時，因模板未密封而漏漿，使粗骨料堆積於錨碇組件處，或混凝土澆置未充分搗實，造成不密實、蜂窩或空洞情形，無法承受車輛荷載的強烈衝擊導致伸縮裝置損壞。
3. 支承鋼箱底部間隙不足，不僅封模處理不易，過度振搗將漏漿，搗實不足則無法填滿底部空間，使支承系統及錨碇系統無法達到設計功能，如圖 4.62 所示。
4. 伸縮縫混凝土澆置後，初凝前澆置完成面未作抹面處理，致生收縮裂縫。
5. 伸縮縫邊梁上翼鈑未留設氣孔，混凝土澆置時未將空氣排出，以致殘留孔隙，無法承受反復衝擊應力。
6. 伸縮縫頂面與鄰近瀝青混凝土或混凝土面未保持平整，引起行車跳動，造成車輛行駛時的衝

擊過大，而引起伸縮裝置破壞。

7. 伸縮裝置兩側混凝土和瀝青混凝土鋪裝層結合不良，或安裝施工過程中使 AC 邊緣崩裂不密實，容易產生開裂脫落，最終引起伸縮裝置的破壞。
8. 由於伸縮縫處的混凝土澆築後，因為趕著通車無法中斷施工，未養護或養護時間不足，施工車輛即通行，影響混凝土強度。

4.2.4 管理維護及其他問題

1. 模組型伸縮縫之等距彈簧、支承橡膠墊為磨耗材，未定期檢查更換，當磨損過度而產生過大間隙時，將造成額外衝擊應力連帶影響其他構件之使用壽命。
2. 齒型伸縮縫排水設施因泥沙淤積堵塞，橋面流水沿伸縮縫流下，導致鋼支承生銹。
3. 保養不良，伸縮縫內淤積砂土或石塊等雜物未清理，影響伸縮功能。
4. 伸縮縫安裝為了趕竣工通車，施工人員對安裝作業往往疏忽大意、馬虎施工，未嚴格按安裝程序及有關要求施作。
5. 交通量增大、車輛超載，高速行駛的重載車頻繁而強烈地衝擊伸縮縫，造成伸縮縫零部件破壞、脫落、鬆動，縮短使用壽命。

由上述各方面影響因素中可發現，施工缺失對日後伸縮縫損壞影響最鉅，茲將施工缺失現象與日後可能損壞情形歸納分析如附錄一所示，俾利對照參考。另由損壞形式與相關影響因素綜合分析結果發現，每一損壞形式均有其相對之影響因素，為方便比對乃予以歸納整理分析如附錄二所示，應可提供設計、施工以及管理維護單位作業時之參考。

4.3 伸縮縫損壞形式與相關影響因素結語

經由前兩節伸縮縫損壞形式與相關影響因素之分析結果可得以下之結語：

1. 伸縮縫最常發生的損壞形式為兩側錨碇無縮收混凝土破裂；而橡膠伸縮縫以螺栓蓋套脫落、橡膠被拉斷、橡膠板剝離為主；鋼製伸縮縫之角鋼型主要為鋼材斷裂，齒型則為錨碇材及鋼鈑焊接處斷裂、鋼齒鈑斷裂、排水槽泥砂堵塞影響排水與伸縮為主；至於模組型伸縮縫則為伸縮彈簧老化、支承墊塊磨損或脫落，鋼樑及錨碇構件焊接處斷裂為主。
2. 損壞之影響因素就(1).設計方面有：伸縮量之計算、產品之相應技術、兩側錨碇混凝土之尺寸強度、橋樑翼版厚度等；(2).材料方面有：橡膠或填縫材質老化、鋼材材質及焊接品質不良與零組件鬆動脫落等；(3).施工方面有：(a).前置作業，包括 AC 面層之平整度、兩端梁間距、預留槽之尺寸、底板之鋪設材料及回填料與夯實度、槽內混凝土異物是否清除等。(b).安裝作業，包括伸縮縫與 AC 面之平整、鋼箱支承點之位置、縫距之調整、假固定釋放時機等。(c).鋼材錨固，包括錨固鋼筋焊接牢固與否、預留筋與錨碇環筋之結合、預留筋之數量與配置、箍筋之尺寸與彎紮等。(d).環氧樹脂塗佈，包括未塗刷環氧樹脂接著劑或未依規定比例調配、採用非新舊混凝土界面接著之環氧樹脂等。(e).無縮收混凝土澆置，包括漏漿使粗骨料堆積於錨碇構件處、支承鋼箱底部未填滿或邊梁上翼鈑未留設氣孔、未充分搗實造成蜂窩或空洞、未作抹面處理致生裂縫或未鋪設平整及未達強度即通車等；(4).管理維護方面有：支承橡膠墊未定期檢查更換、伸縮縫內淤積砂石未定期清理、交通量增大車輛超載超速未有效管制等。
3. 伸縮縫之每一損壞形式均有其相對之影響因素，若能在設計時即針對各種條件考量周詳，選用適合之型式、明定施工說明、妥善使用材料，施工時注意工程品質之控管，完工後注意管

理維護，定能增進伸縮縫之工程品質及延長其使用壽命。



圖4.33 填充砂包未鋪平AC鋪設拱起



圖4.34 預留槽夯填不實凹陷切割線在凹陷斜面上



圖4.35 預留槽夯填不實凹陷情形



圖4.36 預留槽底部間隙未處理好使填充材料流失AC面層受破壞



圖4.37 填充材料軟弱或流失覆蓋之鐵板槽會壓陷AC面層



圖4.38 AC鋪裝應通過預留槽而不應由預留開始鋪設



圖4.39 預留鋼筋不正確須作植筋處理



圖4.40 以保麗龍板隔離端隔梁縫距離確保



圖4.41 預留槽寬度不足而將錨碇桿件扳彎



圖4.42 預留槽深度不足支承箱貼近拖座影響混凝土填滿及其強度



圖4.43 混凝土流入預留槽內影響伸縮縫安裝及鋼筋綁紮施工



圖4.44 鋼筋預留雜亂橋面版端模處理不善內部多孔洞



圖4.45 進橋版側鬆動砂石未徹底清除



圖4.46 鬆動砂石清理後情形



圖4.47 AC面層橫向不平影響伸縮縫安裝之平順



圖4.48 AC面層不平順兩端經常發現有下垂情形



圖4.49 伸縮縫處AC鋪設常有不平順情形



圖4.50 伸縮縫安裝向一邊偏斜



圖4.51 拖座間距太大鋼箱支承點未坐落在混凝土拖座上



圖4.52 伸縮縫安裝偏一邊支承未坐落在混凝土拖座上



圖4.53 伸縮縫安裝偏移致右側預留筋露出



圖4.54 伸縮縫以角鋼焊接固定現場調整縫距困難

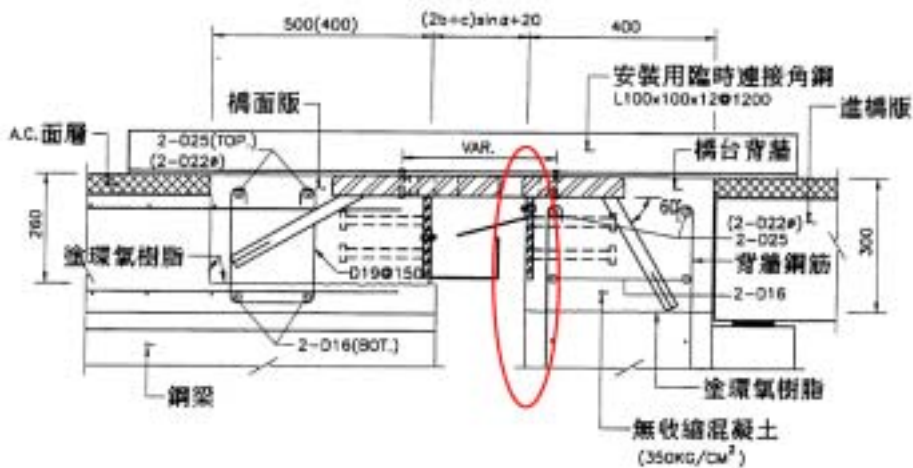


圖4.55 橋台齒型伸縮縫安裝直板與橋台背牆前緣應切齊



圖4.56 伸縮縫安裝比路面高出或太低



圖4.57 支承箱間橋面版預留鋼筋未予綁紮妥善補強筋配置鬆散



圖4.58 預留槽未留設正確致鋼筋綁紮歪斜



圖4.59 預留槽寬度及深度不足，補強鋼筋隨意綁紮



圖4.60 預留槽寬度不足，將錨碇桿彎折，填縫保麗龍板又將預埋鋼筋包住



圖4.61 環氧樹脂塗刷稀薄不均



圖4.62 支承鋼箱底部未封模混凝土無法填滿

五、結論與建議

5.1 結論

本研究以中部地區高、快速公路主線部分橋樑伸縮縫為調查研究對象，以現場調查與資料蒐集分別進行分析、比對結果歸納出四點結論：

1. 調查路段中各種型式之橋樑伸縮縫以齒型使用量最多，模組型次之；而損壞率亦以齒型為最低，模組型損壞率則約為齒型之 3.7 倍。
2. 齒型伸縮縫之損壞現象以兩側錨碇混凝土龜裂、錨碇構件斷裂居多。損壞的原因主要為錨碇構件焊接不良或任意扳彎、預留槽尺寸不足或未確實清理，導致混凝土錨碇強度不足而破壞。
3. 就現場調查結果發現，橋台背牆上方之無收縮混凝土發生龜裂現象，明顯高於橋墩處伸縮縫。
4. 從各項損壞影響因素包括設計方面、材料方面、施工方面以及管理維護各項分析結果發現，以施工方面的影響因素最多，顯示有關單位對於伸縮縫之安裝施工作業管理有待加強。

5.2 建議

經由此研究所做成之結論，為有效解決橋樑伸縮縫因損壞而對行車造成危害，應從設計時即妥善規劃，同時嚴格執行施工品質管理作業，落實養護管理及維修，以確保用路人安全無虞，以下提供幾點淺見，期待透過所有工程參與者共同努力，建設優質橋樑工程。

5.2.1 設計方面：

1. 各種型式伸縮縫損壞率以齒型為最低，加上齒型伸縮縫主要以鋼板焊接製造，不論鋼材或焊接技術，國內都已達到相當水準，品質穩定，採購、安裝、養護維修均較容易，長久以來一般人接受度較高。因此，爾後橋樑伸縮縫之設計選用，建議以齒型為優先考量。
2. 設計單位對於端隔樑間距應考量伸縮縫檢查及維修之作業空間，並於設計圖中即予妥適規劃、設計。
3. 設計圖或施工說明書中明確規定：(1).模組型伸縮縫出廠時應採用夾具固定，不得以鋼材直接焊接方式固定，以免安裝時無法配合溫度調整縫隙。(2).邊梁錨碇環箍或剪力釘之高度應標示清楚，以免植焊過高造成保護層不足及影響錨碇強度。(3).伸縮縫施工計畫書應完整交代新舊混凝土交界面塗布環氧樹脂黏著劑之材料、配比、塗佈量、施工程序等事項。

4. 進橋版端無收縮混凝土部份：(1).進橋版底下回填土方夯實方法，或以其他改良方法降低沉陷變位量。(2).在錨碇混凝土與進橋版界面之間，設置適當的彈性材料緩衝兩者間之應力作用。(3).無收縮混凝土可以改用鋼纖維無收縮混凝土或高強度混凝土，提高伸縮縫兩側混凝土之剛性，以防止其破裂損壞。

5.2.2 施工方面：

1. 廠商進行橋面版施工時，橋面版預留筋應全數預留，當伸縮縫安裝時如受到阻礙再予切除，以免預留位置不符。
2. 預留槽回填砂石料之前，梁端之間隔不論以模版或其他材料處理均須有足夠強度，填充料更應夯壓密實，以免 AC 鋪設完成後因施工車輛、機具或載運 AC 之重車行駛而沉陷，或因底部之鋪設材破裂以致填充料流失，使預留槽凹陷，造成 AC 切割處低於平整面，影響伸縮縫安裝和平順。

5.2.3 管理與養護方面：

1. 主辦單位應調查、統計伸縮縫損壞情形、探討破壞成因，分析各家廠牌的損壞比例，了解品質與價格的關係。建立計價標準及合理的品質規範，以抑制不良產品的進口，確保進口伸縮縫材料之基本品質。
2. 監造單位對於監造人員應加強伸縮縫監工教育訓練，尤其是勤前教育。建議在契約中明定伸縮縫專業廠商應於施工前舉辦施工說明會，說明所使用廠牌伸縮縫之特性與施工流程、施工要領、檢查重點及注意事項，讓實際施工人員及監造人員同時參與，以建立雙方對於施工細節與品質管理之共識。
3. 模組型伸縮縫養護方面，平常巡查可以目視檢查鋼軌間是否積留砂石、間隙是否等距、橡膠帶是否老化或破損以及有無異常聲響等情況。積留之砂石不但影響伸縮功能，若含有碎石經車輛輾壓將造成橡膠破損或縫距不等，而使等距彈簧疲乏、老化或脫落或失效，進而造成伸縮縫整體損壞，因此建議養護單位應定期清理。其次，模組型伸縮縫各廠商大多於型錄中即建議每兩年須至伸縮縫下方巡視各組件狀況，包括等距彈簧、支承彈簧、滑動支承、橡膠帶與每一焊道結合部位，如有損傷即予更換零件或維修，以即時抑止劣因擴大。
4. 齒型伸縮縫齒板底下之排水槽容易積留砂石，其養護要點為定期清理，否則不但影響正常伸縮功能，且雨水無法排除而漫流至支承系統則易造成支承銹蝕而損壞。其次平常巡查應注意錨碇無收縮混凝土有無裂縫，混凝土一旦產生裂縫容易造成錨碇構件斷裂，進而使伸縮縫破壞，若發現裂縫即應進一步探查原因並謀求解決之道。
5. 根據訪查結果得知，目前國道模組型伸縮縫一旦損壞，通常即規劃以豎齒型更換，係因模組型伸縮縫均自國外進口，零件採購作業煩瑣、需時又長，恐緩不濟急，同時因整組換修必須封閉交通，影響層面較大；而豎齒型則可採半半施工以維持交通所致。但就施工成本及伸縮縫應有之使用壽命而言，此種做法並不正確，而且模組型與齒型伸縮縫預留槽並不一定相符，預留槽若太小則可能因擴槽而傷及橋體結構，日後造成更大的危害。因此建議養護單位應以養護維修為主，儘速建立伸縮縫詳細資料，包括零件來源、採購方法，最好模擬損壞狀況與維修方法，平時加強養護巡查遇有異常現象即更進一步深入檢查妥善處理，防止損害繼續擴大。或以開口契約方式發包委託專業廠商辦理養護維修，以維持其使用壽命與功能。

5.2.4 未來研究方向：

1. 有關結論第 1 點，調查路段中各種型式伸縮縫之損壞比例，係依據機關訪查資料統計比較所得，分析立論基礎較薄弱，蓋因以個人之力量實難以進行深入的調查，而以機關立場對於損壞之事物又不希望公開，因此詳細資料取得並不容易。本研究簡略比對伸縮縫之損壞比例，希望能夠拋磚引玉，由相關單位來重視這個問題，進一步建立長期調查及維修相關資料，瞭解每道伸縮縫的損壞原因，以統計分析真切的結果。嚴謹的調查分析應將各種不同的背景因素列入考量，如道路等級、建造費用、通車時間、交通流量、行車速限、重車比例之不同，以及各廠牌伸縮縫本身設計使用年限也不盡相同，對伸縮縫所造成的損壞情形均會有影響，建議未來可朝此方向進一步研究分析。

參考文獻

1. 許瑞麟，「公路橋梁伸縮縫施工實務與問題探討」，公路總局技術座談會，台北，2004 年 8 月。
2. 張吉宏、林春有，「公路橋梁伸縮縫施工要領及問題之探討」，中興工程，第 78 期，第 129-151 頁，2003 年 1 月。
3. 交通部台灣區國道新建工程局，橋梁工程施工實務訓練(第二版)，宋秩宗，「橋樑支承及橋面伸縮縫安裝作業」，1997 年 12 月。
4. 交通部台灣區國道新建工程局，「第二高速公路特殊橋樑專輯」，第 63-80 頁，第 219-233 頁，1999 年 11 月。
5. 交通部台灣區國道新建工程局，「第二高速公路興建專輯橋樑工程篇」，第 175-181 頁，2004 年 1 月。
6. 李有豐、林安彥，「橋樑檢測與評估」，全華科技圖書股份有限公司，第 11-52~11-55 頁，2000 年 10 月。
7. 徐耀賜、萬健民、林維群、蘇暉傑，「橋面伸縮縫之檢測與破壞模式(一)」，現代營建，第 243 期，第 49-57 頁，2000 年 3 月。
8. 徐耀賜、萬健民、林維群、蘇暉傑，「橋面伸縮縫之檢測與破壞模式(二)」，現代營建，第 244 期，第 45-48 頁，2000 年 4 月。
9. 邱昌平，「高速公路橋樑橡膠伸縮接縫損壞之研究」，台北市，台大土木所結構工程組，1979 年。
10. 陳龍泉，「橋樑及高架道路伸縮縫之設計與施工研究」，國立交通大學交通運輸研究所，碩士論文，1981 年。
11. 交通部臺灣國道高速公路局，「高速公路橋面伸縮接縫設計與施工之研究」，1982 年 2 月。
12. 交通部台灣區國道新建工程局，「國道三號中南部路段品質缺失改善專案報告」，2004 年 10 月。
13. 臺灣省公路局，「公路橋樑細部結構之研究」，第 86-129 頁，1981 年 8 月。
14. 陳國隆，「國道橋梁工程技術的演進」，國工局網站，<http://www.tanceeb.gov.tw/14/140101.htm>，2004 年 9 月 14 日。
15. 林登淵，「公路橋樑伸縮縫損壞調查與相關影響因素之研究」，朝陽科技大學營建工程系，碩士論文，2005 年 7 月。

附 錄

附錄一 施工缺失現象與日後可能損壞情形分析表

項次	施工缺失現象	日後可能損壞情形
1	填充砂包未鋪平，AC 鋪設拱起。	將導致預留槽處 AC 面層鋪設不平整，造成伸縮縫安裝產生高差。
2	預留槽夯填不實明顯凹陷，切割線在凹陷斜面上。	伸縮縫安裝明顯無法與 AC 面層平順，增加行車衝擊力量，將縮短其使用壽命。
3	預留槽底部間繫未處理好使填充材料流失，AC 面破壞已影響到切割面。	填充材料流失使 AC 面層不規則斷裂，影響切割線之平整或切割位置，一旦 AC 切割超過混凝土，將使後澆置之混凝土形成條狀弱面。
4	填充材料軟弱或流失，上面雖覆蓋鐵板仍會壓陷 AC 面層。	影響情形與上述相同。
5	AC 鋪設應通過預留槽而不應由槽開始鋪設。	將導致預留槽處 AC 面層鋪設無法平整，造成伸縮縫安裝產生高差。
6	預留鋼筋不正確須作植筋處理；大伸縮量要注意混凝土間距是否足夠。	預留鋼筋不足將影響錨碇力，易造成混凝土裂縫，錨碇構件斷裂。
7	以保麗龍板隔離端隔梁縫距離確保，可能形成縫距不足。	保麗龍隔板彎曲縫距不足且不均，而伸縮縫處又有六個自由度之變位，熱漲時將會造成兩端樑體相互頂撞破壞。
8	預留槽深度不足支承箱貼近混凝土，將影響無收縮混凝土填滿及其強度。	支承鋼箱底部貼近混凝土表面，導致無收縮混凝土無法填滿或因厚度太薄強度不足，承受反復載重後破碎，使支承系統鬆動終至破壞。
9	左側進橋版爆模，預留槽寬度不足，將錨碇桿件扳彎。	進橋版爆模使混凝土凸出，當無收縮混凝土覆蓋其上，進橋版一旦下陷將會產生裂縫；另預留槽寬度不足，又將錨碇桿件扳彎，混凝土錨碇力不足，構件受力改變，嚴重影響伸縮縫應有強度。
10	橋面版端模處理不善使混凝土流入槽內，影響伸縮縫安裝及鋼筋綁紮施工。	混凝土流入槽內改變預留槽形狀，造成錨碇混凝土不平均，無法正確配筋，易造成錨碇失敗。
11	鋼筋預留雜亂，橋面版端模處理不善內部多孔洞。	澆置混凝土若未加強搗實填滿孔洞，日後受行車衝擊，混凝土極易破碎，終致伸縮縫錨碇構件甚至鋼梁斷裂。
12	進橋版側邊砂石分離散落未徹底清除。	槽底中浮渣，使新舊混凝土界面粘結不良，界面易產生裂縫終將導致混凝土破裂。
13	AC 面層橫向不平影響伸縮縫安裝平順。	伸縮縫安裝無法與 AC 面平整，兩者間高差增加車輛衝擊力，易使零組件受損破壞。
14	拖座間距太大或安裝偏一邊，鋼箱支承點未坐落在混凝土拖座上。	強大的衝擊力直接由鋼箱承受，使鋼箱底部焊接開裂，支承墊塊跳脫，鋼梁因反覆疲勞應力而斷裂。
15	伸縮縫以角鋼焊接固定，現場調整縫距困難。	伸縮縫安裝須按當時氣溫調整縫距，如安裝縫距不符，不論過大或太小，終將致使伸縮縫破壞。
16	橋台齒型伸縮縫詳圖，直板與橋台背牆前緣切齊。	橋台齒型伸縮若對準樑版縫中心安裝，直板會偏向進橋版端，使錨碇混凝土寬度縮小，為使混凝土達設計寬度則會往進橋版上覆蓋延伸，進橋版一旦下陷將會產生裂縫。
17	伸縮縫安裝比路面高出或太低。	伸縮縫安裝無法與 AC 面平整，兩者間高差增加車輛衝擊力，不但造成行車不適，同時使伸縮縫組件易受損破壞。
18	支承箱間橋面版預留鋼筋未予綁紮妥善，補強筋配置鬆散。	直接把補強鋼筋箍筋加寬、橫向鋼筋分散，屬於橋面版部份配筋並未增加，形成橋版端部之脆弱。
19	預留槽未留設正確，致鋼筋綁紮歪斜或隨意綁紮。	預留槽尺寸不足，補強鋼筋綁紮歪斜不正，喪失補強筋應有之功能，將造成混凝土錨碇強度不足，易發生破裂，錨碇構件鬆動，進而使伸縮縫整體破壞。
20	預留槽寬度不足，將錨碇桿彎折填縫保麗龍板又將預埋鋼筋包住。	保麗龍板固定不易，灌注混凝土時容易浮動，又已包住預埋鋼筋，日後鋼筋裸露將銹蝕；而預留槽寬度不足並將錨碇桿彎折，造成混凝土錨碇力不足，構件受力改變，嚴重影響伸縮縫應有強度。
21	環氧樹脂塗刷稀薄、不均。	影響新舊混凝土結合，界面易產生裂縫。
22	支承鋼箱底部未封模、混凝土未填滿，過度振搗則會漏漿。	支承鋼箱底部混凝土未填實，將使錨碇構件鬆動，加速零組件損壞，鋼梁因受反覆振動而斷裂，進而使伸縮縫整體破壞。

附錄二 伸縮縫損壞形式與相關影響因素

伸縮縫型式	伸縮縫損壞形式	伸縮縫損壞之相關影響因素
橡膠型伸縮縫	1. 錨碇混凝土開裂破碎、出現坑洞，進而引起橡膠板脫落。	1. 混凝土強度不足、補強筋不足或錨碇不當，新舊界面黏著劑使用不當，黏結效果差。
	2. 固定橡膠板的螺栓銹蝕或被車輪衝擊剪斷，橡膠板被撕裂脫離。	2. 伸縮縫零組件安裝未確實，運輸或儲存不當，零組件鬆脫、掉落；橡膠老化破壞。
	3. 錨固構件鬆動，橡膠連接部位破裂，橡膠被拉斷脫落。	3. 錨固構件之焊接不良斷裂，或焊接不當使應力無法傳遞；橡膠連接部位受集中應力破裂。
	4. 橡膠板被扯斷填充料被拉離。	4. 橡膠或填縫劑材料老劣化、斷裂；行車超載、超速增加衝擊力；伸縮間隙超過設計值。
	5. 橡膠板剝離預埋鋼板外露。	5. 橡膠材料剪斷力不足、鋼板與橡膠之粘着不良。
	6. 板式橡膠伸縮縫螺栓蓋套脫落、橡膠老化、損傷破壞。	6. 橡膠伸縮縫之材質性能缺陷，蓋套受行車衝擊而鬆脫；橡膠老化破壞。
鋼製型伸縮縫	1. 錨碇混凝土破裂，角鋼伸縮縫角鋼斷裂，錨碇鋼筋斷裂脫落。	1. 補強筋不足或錨碇不當，混凝土強度不足破裂，錨碇構件焊接不良或焊接不當，造成錨碇鋼筋及角鋼承受集中應力而斷裂。
	2. 豎齒型伸縮縫錨碇構件斷裂齒板陷落。	2. 鋼板剛性不足、錨碇構件焊接不良或安裝不平或車輛超載，增加額外衝擊力。
	3. 齒型指板伸縮縫錨碇螺栓剪斷，指板脫落。	3. 指板錨碇螺栓太細、強度不足或錨碇不良，螺栓鬆動經反復車輛衝擊脫落。
	4. 齒型伸縮縫進橋版錨碇端下陷，造成齒板轉動翹起。	4. 橋台或進橋版基礎施工缺陷，使橋台或進橋版產生變位，錨碇構件損傷齒板上翹。
	5. 齒型伸縮縫鋼板及錨碇構件斷裂脫落，鋼板在焊接處斷裂。	5. 混凝土施工不良錨碇力不足，錨碇構件焊接不良或錨碇桿件不足、焊接位置在車道上。
	6. 齒型伸縮縫間積滿砂土，影響伸縮功能。	6. 未定期養護清理。
	7. 錨碇混凝土破裂、錨碇構件斷裂。	7. 預留槽尺寸不足、錨碇桿件扳彎或錨碇構件焊接不良；伸縮縫安裝偏心致錨碇混凝土寬度不足或施工不良均易造成混凝土破裂、錨碇構件斷裂。
模組型伸縮縫	1. 支承墊塊磨損或脫落使鋼梁承受過大反復荷重疲勞而斷裂。	1. 支承墊塊因使用日久磨損間隙變大經衝擊而跳脫，有些支承墊塊設計不良無卡榫容易脫落，致使鋼梁承受過大反復荷重疲勞而斷裂。
	2. 控制系統鋼梁焊接開裂致使鋼梁下陷。	2. 鋼箱支承點未座落在混凝土托座上，鋼梁焊接不良，當重車經過造成變形過大沉陷，使鋼梁焊接開裂、下陷。
	3. 鋼支承箱底部混凝土澆置不實，造成支承箱鬆動。	3. 支承鋼箱底部貼近混凝土托座，側面未封模導致混凝土流失，或澆置時未充分搗實，造成支承箱鬆動，因振動過大而使伸縮縫破壞。
	4. 鋼支承箱支承點未座落在混凝土托座上，鋼支承箱懸空，荷載後箱體開裂，支承墊塊跳脫進而使鋼梁斷裂。	4. 預留槽留設尺寸不符或位置不對，支承鋼箱支承點未能座落在混凝土托座上；焊接不良或鋼箱受行車衝擊開裂，致使鋼梁斷裂。
模組型伸縮縫	5. 等距彈簧失效軸承桿頂住鋼板而撐開，造成邊樑縫距異常、橡膠帶脫落。	5. 橋樑混凝土乾縮潛變超出預期，氣溫變化太大，伸縮縫安裝間隙未調整適當或沒有調整平順；組裝時改變等距彈簧尺寸。
	6. 模組型伸縮縫模縫中填滿砂土，影響伸縮縫正常伸縮功能。	6. 未定期養護清理。
	7. 錨碇混凝土破壞因修復後過早開放通車，以致修補之混凝土再度破碎，鋼梁亦隨之再次斷裂	7. 錨碇混凝土澆置後未養護達一定強度，因車輛衝擊破碎，鋼梁因反復衝擊振動而斷裂。

附錄二 伸縮縫損壞形式與相關影響因素【續】

伸縮縫型式	伸縮縫損壞形式	伸縮縫損壞之相關影響因素
	8. 錨碇混凝土破裂、鋼梁斷裂，鋼梁以鋼板局部焊接覆蓋修補，但破壞持續延伸擴大。	8. 混凝土施工不良或強度不足破裂，錨碇構件鬆動使鋼梁承受反復應力而斷裂；錨碇構件焊接不良或焊接不當；鋼板局部焊接使應力轉移造成破壞延伸擴大。
	9. 錨碇混凝土受撞擊碎裂，伸縮縫邊樑彎曲變形，伸縮縫本體扭曲或軌間高差過大。	9. 遭受特殊撞擊，致使混凝土破裂，邊樑彎曲變形，無法正常伸縮運作，將使中間支撐樑或支撐橫樑因而加速疲勞及剪斷破壞。
	10. 填縫橡膠破裂脫落。	10. 橡膠材質不佳、老化或與鋼梁結合不良，伸縮縫安裝太高或太低，當車輛經過時均會增加其衝擊力。
	11. 等距伸縮彈簧老化損壞。	11. 模組型伸縮縫之等距彈簧因老化剝落，未定期檢查更換，將造成縫距不均之現象。
	12. 支承墊塊磨損。	12. 模組型伸縮縫之支承橡膠墊為磨耗材，未定期檢查更換，當磨損過度而產生過大間隙時，將造成額外衝擊應力使鋼梁破壞。



建立公路隧道安全評估方法

吳健生* 俞裕中**

摘要

台灣地區地狹人稠，主要屬山區地形，近年來為平衡城鄉的發展，已積極向東部地區發展。為跨越山區連接東部區域，公路設施將不可避免地以長隧道的型式加以興建。公路長隧道最重要的課題為其行車的安全，萬一隧道內發生事故，勢必須依賴所設置的安全設施協助用路人逃生；而隧道內安全逃生設施是否充足，對用路人的安全具有絕對性的影響，故近年來隧道安全的整體評估，已成為重要的研究課題。本研究順應此一趨勢，參酌世界先進國家的方法與技術，以風險潛勢與安全潛勢的觀念，完整考量隧道安全相關設施與措施，並藉由客觀的數據與評分，進行隧道安全等級評估，再由評估結果找出影響安全的重要因素，供相關管理單位參考。同時，藉此新方法的建立，提供國內隧道安全管理另一種思維，希冀由此評估方式能對隧道安全的改善有所貢獻，並作為未來發展隧道管理系統的主要依據。

關鍵詞：安全評估、風險潛勢、安全潛勢

Abstract

Taiwan is a mountainous and densely populated island. In recent years, the government has put many efforts to construct traffic links between western part and eastern part in order to balance the development discrepancy between them. To overcome the high mountainous terrain, mainly the Central Mountain Range, the construction of long road tunnels becomes inevitable. The driving safety in long road tunnels is, therefore, highlighted, and relies on the sufficiency of safety facilities as well as the efficiency of control and rescue measures. However, for judging the safety extent by driving in a road tunnel, there must be a comprehensive safety assessment method available. For this purpose, this study develops a safety assessment procedure based on risk potential and safety potential. Through integrating both the risk points and safety points evaluated in terms of risk potential and safety potential respectively, a result index can be calculated and further used for ranking the safety level of the tunnel. This assessment method can also be extended as the dominant part of the tunnel management system in the future.

Keywords : safety assessment, risk potential, safety potential

一、前言

台灣地區地狹人稠，主要屬山區地形，近年來為平衡城鄉的發展，並拓展生活的空間與增

* 國立中央大學土木工程學系副教授

** 國立中央大學土木工程研究所研究生

進城際間的交流，已積極向東部地區發展。為跨越山區連接東部區域，公路設施將不可避免地以長隧道的型式加以興建。隧道為一特殊空間，具有封閉、可及性低、狀況不明、聯絡與救援困難等特性，故在增進隧道安全、降低隧道事故發生機率以及利用逃生設備降低事故傷害程度方面，皆為其安全與否所須注重並致力之要項。而影響隧道行車安全的設施，為隧道內發生事故時的重要逃生依賴，故隧道設施安全的考量與評估，將成為未來國內重要的研究課題。

另就世界發展的趨勢來看，現行公路隧道的散佈密度以歐洲最為。自 1999 年起，隨歐洲長隧道接連發生數起造成重大傷亡的事故之後，引起歐盟廣泛的重視與省思，隨即於隔年建立一專責機構—EuroTest，負責檢查並評估現行歐洲公路隧道的風險程度與安全性，以供歐盟各國隧道管理部門參考並進行改善。此一計畫稱為 EuroTAP (European Tunnel Assessment Program)，參與的組織成員共 13 國 14 個機構，其中以英國 AA (The AA Motoring Trust) 與德國 ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobil Club) 兩個組織為首，領導 EuroTAP 的運作。計畫將逐年檢測與評估 30~50 座公路隧道，期能至 2007 年將歐洲現有隧道評估完成，並提供最低限度之安全規範與水準，以作為歐盟各國隧道管理機構的依循標準。

根據統計，台灣地區目前運轉中的公路隧道已超過 200 餘座，其中部份已有二、三十年的歷史，而四、五十年者亦不在少數。其是否仍符合現行世界的安全標準，實有待進一步的評估與確認；此外，近年來亦有不少相當長的公路隧道陸續開放使用，其安全性格外受到重視。本研究為順應此一趨勢，參酌世界先進國家的方法與技術，以風險潛勢與安全潛勢的觀念，完整考量隧道安全相關設施與措施，並藉由客觀的資料與評分方法，進行隧道安全等級評估，並由評估結果找出影響安全的重要因素，供相關管理單位參考。同時，藉此新方法的建立，提供國內隧道安全管理另一種思維，希冀由此評估方式能對隧道安全的改善有所貢獻。

二、文獻回顧

早期公路隧道安全方面的研究，多僅針對隧道內可能發生的事件與狀況進行分析與改善，直到 1999 年歐洲連續發生多起重大公路隧道交通事故之後，全面性的安全及風險評估才引起廣泛的重視與探討，以下選擇其中若干代表性文獻回顧如下。

Tetzner (2005) 於 CEDR Paris 會議當中說明目前歐盟 EuroTest 所持續進行之隧道安全評估計畫，主要內容包括安全評估所使用的參數，以及如何進行因子換算與最後的分級應用，其評估方法可作為相關隧道管理單位未來進行安全評估的參考與依據。

EuroTest (2005)、(2003)、(2002) 及 (2000) 為 EuroTest 所出版的年度報告，由英國 The AA Motoring Trust 發行，主要在報告 EuroTest 各年度所採用的評估方法與評估結果。EuroTest 所評估的隧道數量，由 2000 年的 25 座、2002 年的 30 座、2003 年的 25 座，至 2005 年的 49 座。報告除提供所測隧道的基本參數值，包含隧道長度、單或雙向通行、單孔或雙孔、速限、每日車流量以及重車比外，尚著重其所發展的評估方法、安全分級方式以及隧道優缺點的評估。報告所列評估結果的優點，可供其他相關管理單位參考。若存在缺點，則註明可改善的項目，供相關管理單位或決策者在預算許可的情況下，作為訂定缺失改善優先順序的依據。

世界道路協會 (the World Road Association—PIARC, 2005) 成立於 1909 年，是世界上最早舉辦道路政策、道路技術與道路管理研討的組織，提供世界各國相關議題相互交流資訊的平台。根據 2005 年報的內容，目前加入的會員國數為 109 國，其在隧道技術研討上提供許多改

善隧道安全的先進技術與觀念，可作為相關研究的重要參考依據。

至於國內方面，早年楊冠雄與吳健生（1995）結合通風與交控技術，運用數值模擬方式建立隧道通風、交控整合系統之數值分析，用以評估通風系統設計與運轉策略之有效性，以增進隧道行車的安全。研究內容主要分為通風與交控兩部分，藉由空氣動力（aerodynamic）、交通（traffic）、污染擴散（pollution）及運轉控制（control）四大模式的整合進行分析，結果並與日本隧道設施實例比對，不準度可控制在 3~5%之內，可應用於實際的工程設計。

吳健生等（1995）參考國內外相關文獻與經驗，首先針對隧道內所有可能發生的狀況進行分析，其次就各種狀況分別提出適當的因應控制策略，並據以擬定必要之交控反應措施；最後在交控需求的考量下，訂定不同控制策略下相關設施之設置需求與標準，據以建立一套規劃隧道交控系統的法則，供未來系統規劃的參考。為便於查詢與參考，另將上述分析成果使用 FORTRAN 程式語言編寫成一套完整的電腦輔助規劃系統，以簡單的操作流程與明確的圖文並列方式，供使用者快速取得所需之參考資訊。由於此一規劃輔助作業程序與隧道實際管理作業極為近似，因此可作為建立隧道交控標準作業程序的參考。

吳健生等（1998）進一步結合機電、交控、緊急與安全逃生以及營運管理各領域的專業知識與技術，並參酌世界各國相關準則，研擬一套適合國內公路長隧道使用之安全設施準則。其內容將隧道安全設施劃分為機電，交通監控，緊急與安全逃生以及營運管理等四大類，其中機電設施又分為通風、照明與供電三項，交通監控設施又分為交通監視設施（含車輛偵測器與閉路電視系統）及交通控制設施（含交通號誌、車道管制號誌、固定交通標誌、速限可變標誌、可變交通標誌與資訊可變標誌）兩項。本準則內容完整，與世界各國相關準則相比毫不遜色，可作為國內高速公路隧道規劃設計的參考。

簡賢文（1998）針對公路隧道的防災與救援進行探討，以有效控制災後的損失，確保隧道運轉的安全。該研究除在現有體制下，建立若干可供參考之公路隧道防災基本對策與具體作法外，尚透過研討方式，就複雜之救災支援體系及作業內容進行意見溝通，瞭解各相關單位的立場及需求，作為建立實際解決方案的依據。

王進輝（1998）針對危險物品經由隧道運送的風險進行研究，結果發現，水底隧道與市區隧道之肇事率明顯高於郊區隧道與城際隧道，影響肇事的因子主要為肇事地點與行車分向。同時並以危險化學物品丙烯晴為例，比較分析中和-新店間不同路段運送的風險。結果顯示，允許其經由北二高隧道路段運送之風險反而較低，其主要原因在於替代路徑須通過市區，周遭人口稠密，外洩事故造成人員傷亡損失較重所致。另由敏感度分析可知，隨事故影響範圍的增加，路段風險亦隨之增加。

郭富森（1998）有鑑於公路隧道內空氣的品質受到車流量大小及通風系統控制的良窳影響極大，故利用通風機配合車流管制先期運轉的方式，整合建立一套隧道通風與交控連動控制的機制，並以北部第二高速公路福德隧道為例，發展一套模擬程式評估其績效。結果顯示，該套機制在車流需求量大於隧道容量時效果良好，除可降低隧道內廢氣濃度，減少用路人旅行時間外，尚可降低風機的運轉成本。

邱豪磊（2002）探討國外隧道防災議題中可供學習之風險辨識、風險分析及風險處理等相關內容，並搭配公路隧道危險事故與風險評估在工程設計、建造及營運管理上之應用，研訂符合本土之隧道安全體制。以適當的風險評估方法提昇公路隧道安全管理模式，增進我國隧道建

設與防災技術，保障用路人的安全。

周胤德等（2004）探討自 1999 年起歐洲所發生的三起重大公路隧道事故，及其後續因應事故缺失所進行的設備與措施改善，同時亦針對發生於國內北二高隧道的案例提出省思與對策。最後分別在硬體與軟體兩部分進行建議事項，期能因此避免或減低重大災難的重演，維護公路長隧道的用路安全。

吳健生等（2004）有鑑於北宜高速公路雪山隧道已接近完工，未來發生重大災難時的救援行動極富挑戰性，因此在人命搶救及救援安全優先考量之原則下，針對如何在極短時間內集結大量消防能量進行損害控制，及其配合的指揮機制為何進行探討。結果顯示，依現行法規，公路隧道救災指揮體系牽涉範圍極廣，包括管理、執法、消防及環保等單位，事權不易統一，一旦面臨重大災變，將難以因應。因此，在專業性、及時性與設置成本等因素的考量下，應儘速設立專屬雪山隧道之重大災害救援機制，特別是成立專屬消防隊，配備特殊消防器材，以因應重大災害救援所需，發揮完整的隧道防災功能。

劉鈺文（2005），以雪山隧道為例，針對公路長隧道火災所產生的濃煙危險，進行人員疏散逃生方案之研究。並由巨觀與微觀的角度，結合供需分析之概念，以單位時間隧道可疏散的人數為供給，單位時間受困於隧道內須逃生的人數為需求，模擬評估各種疏散方案的績效，包含傷亡人數、疏散時間及延滯時間三種。研究結果顯示，在最危急的情況下，若事故發生於車行橫坑下游時，若能將部分用路人順車行方向疏散，將可減少傷亡人數。

三、隧道安全評估現況

1999 年歐洲公路隧道接連發生兩起重大傷亡事故，分別為是年 3 月 24 日於法國 Mont Blanc 隧道，因滿載奶油與麵粉的貨車漏油起火造成 41 死的慘劇，及 5 月 29 日於奧地利 Tauern 隧道，因運載漆罐的貨車與四輛轎車碰撞起火造成 13 死 49 傷的重大意外。連續兩件重大傷亡事故的發生，使歐洲各國交通主管部門重新審視隧道安全的問題。

事實上，在 1999 年以前，歐洲各公路隧道皆發生過大小不一的事故，而相關研究單位亦曾思考過事故的發生可能會導致重大的災難，故對隧道的安全皆進行過評估與調查。經由之前的肇事紀錄與頻率分析得知，隧道中事故發生的機率其實遠低於一般開放路段與橋樑，因隧道具有不受天候影響的優勢。然而，研究的同時亦發現隧道與生俱來的安全缺陷，例如隧道為一密閉空間，單一視覺感受易使駕駛疲倦，且隧道內廢氣的排放極為重要等。但直到 1999 年上述兩起重大事故發生之後，才開始正視隧道安全改善的空間。

有鑑於此，歐盟自 1999 年起成立一專責機構—EuroTest，藉由 EuroTAP 專案計畫的推動，發展並建立隧道安全評估的方法；同時計畫以 7 年的時間，針對歐盟境內 30~50 座重要公路隧道逐年進行安全檢測，期能至 2007 年完成後，提供最低限度之安全規範，作為歐盟各國隧道管理機構的依循標準。

截至目前為止，EuroTAP 計畫所發展出來的隧道安全評估方法，主要是由行車風險與設施安全的角度切入，分別評估其風險潛勢（Risk Potential，RP）與安全潛勢（Safety Potential，SP），並將兩者透過轉換及尺度整合計算出分級百分比，而後據以判定其安全等級。目前 EuroTAP 專案計畫仍在持續進行中，但自 2001 年瑞士 St. Gotthard 隧道再次發生重大事故後，促使安全評估方法的研擬與議定更為加速與完備。

四、隧道安全評估方法

4.1 評估方法及步驟

隧道行車安全分析一般分為安全技術現況評估、危險物品運送風險分析、非危險物品運送安全分析三大類 (Scheiwiller, 2003)，其中安全技術現況評估是以隧道控管及救援技術為對象，進行事前防護與事後救援及損害控制能力的評估；危險物品運送風險分析主要在評估危險物品經由隧道運送時，發生事故的機率及其潛在的危害；而非危險物品運送安全分析則是在評估一般車輛行經隧道時之風險。

由於本研究所採評估方法係針對隧道整體行車安全進行綜合性的評估，故須將上述三類安全評價結果整合成單一指標，以利後續隧道安全等級的評定。本研究參考 EuroTest 所發展的方法，由風險及安全兩個角度切入，針對單一隧道孔進行評分。此處風險泛指所有人、車曝露在隧道中可能引發的潛在危險，包括上述危險物品運送風險與非危險物品運送安全兩者；而安全則係指隧道控管及防護、救援的能力。依此原則，首先分別建立風險潛勢 (Risk Potential, RP) 與安全潛勢 (Safety Potential, SP) 兩個指標並給予評分，其次將兩者整合成為單一指標-分級百分比 (Result)，最後再由分級百分比進行安全分級 (Ranking)，評定隧道的安全等級。

綜合以上所述，建立隧道安全評估流程如圖 1 所示。整個評估流程主要分為下列四個步驟：

步驟 1：風險潛勢 (RP) 評估

步驟 2：安全潛勢 (SP) 評估

步驟 3：計算分級百分比

步驟 4：隧道安全分級



圖 1 隧道安全評估流程

風險潛勢與安全潛勢係依據影響隧道行車安全的可能因素加以評分，故在建立評估方法之前，應先針對可能影響隧道行車安全的因素進行分析，通常可由下列四個角度加以觀之：

1. 實體狀態，主要是指隧道的幾何形狀，包括單或雙孔、長度、坡度、車道數、斷面大小、是否有車道匯入或交叉等。實體狀態若不佳，即須輔以適當的控管措施，否則會影響到行車的安全。
2. 控管方式，主要包括單或雙向行車、重車管制、危險物品管制、速率限制、禁止變換車道、流量管制、行車間距管制等。管制愈嚴格，愈能提高行車的安全，但相對地亦會降低輸運的效率。

3. 曝光量 (exposure)，即車輛使用隧道時，實際曝露於隧道中的潛在危險能量，其計量方式一般有車流量、交通績效 (車公里數) 以及重車比或重車交通績效等。曝光量愈大，隧道發生意外的機率即愈高。
4. 安全設施，用於預防或降低隧道災害的程度，包括通風、照明、電力、消防、交通監控以及緊急與安全逃生等項目，視實際的需要重點或等間距佈設。安全設施愈完備，用路人所受到的保障即愈高，但相對地所付出的成本亦愈高。

以上任何一項因素的有無或強化程度，均會對隧道的行車安全造成一定的影響。因前三項因素與隧道的行車風險有密切的關係，故將之列為風險潛勢評分的主要項目，而安全潛勢則是以第四項-安全設施作為評分的主要依據。有關風險潛勢與安全潛勢的評分方式，將分述於 4.2 及 4.3 節。

由風險潛勢與安全潛勢的評估，可分別獲得風險分數 (Risk Points) 與安全分數 (Safety Points)。在整合此兩項評分之前，須先將風險分數轉換成風險比率因子 (Risk Rating Factor, RRF)，而後再與安全潛勢 (SP) 相除，得分級百分比如式 (1) 所示。

$$\text{分級百分比} = \frac{SP}{RRF} \dots\dots\dots (1)$$

分級百分比求得之後，隨即進入最後之安全分級評判。隧道安全分級參考 Euro Test, 2005 建立如表 1 所示，將隧道安全分為優、良、可、劣及極劣五個等級，分別對應於不同的百分比範圍。

表 1 隧道安全分級表 (EuroTest, 2005)

安全等級	分級百分比
優 (very good)	≥ 90%
良 (good)	≥ 80%
可 (acceptable)	≥ 70%
劣 (poor)	≥ 60%
極劣 (very poor)	< 60%

4.2 風險潛勢評估

風險潛勢大小係以風險分數加以表示，評估時可參考 Tetzner，按影響隧道行車安全的因素分為交通績效 (Traffic Performance)、重車交通績效 (Traffic Performance of HGV)、交通型態 (Type of Traffic)、交通量 (Traffic Volume)、危險物品運送 (Transport of Dangerous Goods)、縱向坡度 (Longitudinal Slope) 以及其他 (Additional) 等七項風險參數 (Risk Parameters)，各項參數的內容、評分及其對風險的影響如表 2 所示。評分時，依據各參數對肇事機率 (Probability) 與肇事嚴重程度 (Extent) 影響的大小，在所定範圍內評定其風險分數，並將其加總得到總風險評分 (Total Risk Points)。

a. 交通績效為每日車流量 (Daily Traffic Volume, DTV) × 隧道長度 (Tunnel Length) × 365。

下述七項風險參數之中，交通績效係依據表 3 所定標準進行評分。績效值愈大，表示曝光量愈高，其風險分數自然亦愈高。由於重型車相對於一般車輛有較高的風險，故將其績效單獨列為一項進行評分，但績效值是以每日車公里為計，其評分標準如表 4 所示。交通型態係指隧

道孔內車輛通行的方式，通常分為單向與雙向兩種方式。若為單向通行，得風險分數 1 分。若為雙向，則給予 8 分，因雙向行車容易受到對向來車的干擾，且對撞的風險相對提高。至於交通量，則可參考表 5 的標準進行評分，總共分為 5 個等級，由最低的 1 分，即每日每車道 2,000 輛以下，至最高的 5 分，即每日每車道 25,000 輛以上。

表 2 風險參數定義與影響 (Tetzner, 2005)

風 險 參 數	說 明	最高風險分數值	影 響
交通績效	每年使用隧道之總車公里數 ^a	(0...) 8	肇事機率
重車交通績效	重車績效佔總績效之百分比	(0...) 8	肇事機率 肇事嚴重程度
交通型態	單向或雙向通行	(1 or) 8	嚴重程度
交通量	每日每車道之車輛數	(0...) 5	肇事機率 肇事嚴重程度
危險物品運送	允許或禁止	(0...) 5	肇事機率 肇事嚴重程度
縱向坡度	縱向最大坡度	(0...) 3	肇事機率 肇事嚴重程度
其 他	車道匯入/交叉路口/長路段大坡度	(0...) 3	肇事機率

表 3 交通績效評分標準

風險分數	交 通 績 效 (百萬車公里/年, mio veh*km/yr.)
0	0...1.0
1	1.01...2.0
2	2.01...5.0
3	5.01...10.0
4	10.01...20.0
5	20.01...40.0
6	40.01...70.0
7	70.01...100.0
8	>100

表 4 重車交通績效評分標準

風險分數	重車交通績效 (車公里/日/孔, veh*km/d/tube)
0	0
1	1...500
2	501...1,000
3	1,001...2,000
4	2,001...4,000
5	4,001...8,000
6	8,001...20,000
7	20,001...40,000
8	>40,000

表 5 交通量評分標準

風險分數	交 通 量 (輛/日/車道, veh/d/lane)
0	0...2,000
1	2,001...4,000
2	4,001...8,000
3	8,001...15,000
4	15,001...25,000
5	>25,000

表 6 縱向坡度評分標準

風險分數	縱向坡度 (%)
0	< 0.5
1	0.5 ~ 1.5
2	1.5 ~ 3.5
3	> 3.5

表 7 其他部分評分標準

風險分數	其 他
0	● 隧道內是否有車道匯入
1	● 隧道內是否有交叉路口
2	● 隧道內是否有陡坡路段
3	

有關危險物品運送評分方面，由於涉及的物品種類繁多且基本特性差異極大（王進輝，1998），縱使是 EuroTAP 計畫亦仍在不斷研議與調整評分方法當中，故目前尚無具體而完整的定論。所幸現有公路長隧道大多禁止危險物品運送，不致造成實際評分的困擾。至於縱向坡度的風險評分，本研究依據邱豪磊（2002）「公路隧道風險評分表」中的四項風險分級建立評分等級如表 6 所示。而在其他部分，則主要考量隧道內是否有車道匯入、是否有交叉路口以及是否有陡坡路段等三項因素（見表 7）。若任一因素存在即給予 1 分，故總分最低 0 分，最高 3 分。

上述評分加總所得之總風險分數，可藉由圖 2 之對應關係進行轉換（Tetzner, 2005），求得風險比率因子（RRF）與風險分級（Risk Classification）。風險分數與風險比率因子間之轉換關係可參考圖 3 進行，當風險分數介於 1 與 29 之間時，兩者呈線性（linear）關係，其關係式如式（2）所示。

$$RRF = \frac{1}{70} \cdot \text{Risk Points} + \frac{41}{70} \dots\dots\dots (2)$$

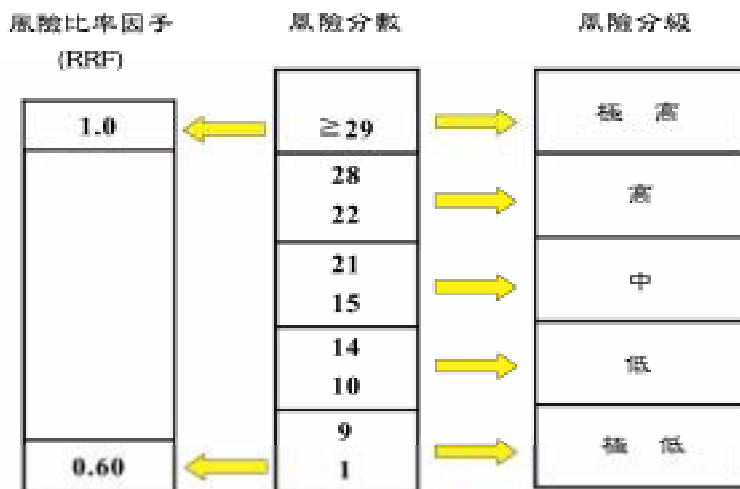


圖2 風險分數、風險比率因子及風險分級關係圖(Tetzner, 2005)

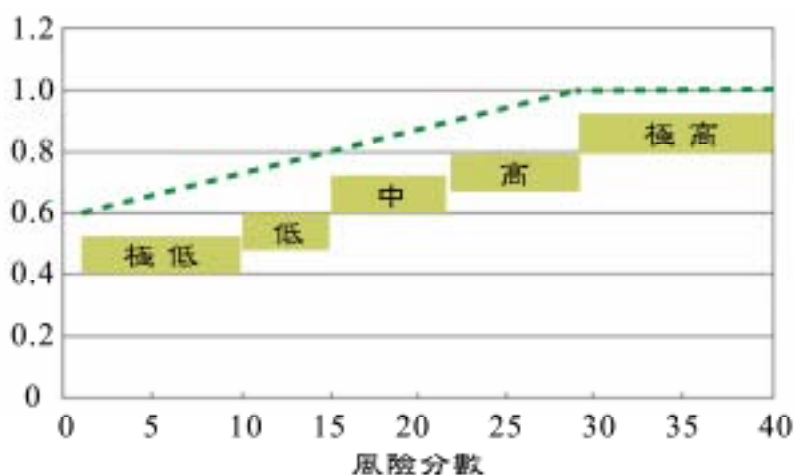


圖3 風險分數與風險比率因子轉換關係圖 (Tetzner, 2005)

4.3 安全潛勢評估

安全潛勢 (SP) 為總安全得分數 (Total Safety Points, TSP) 佔最高安全得分數 (Total Max. Safety Points, TMSP) 的比例，即安全防護達成的程度，其計算如式 (3) 所示。

$$SP = \frac{TSP}{TMSP} \times 100\% \quad (3)$$

安全潛勢的評估項目依據 EuroTest 2005 分為隧道系統 (Tunnel System)、照明與電力 (Lighting and Power Supply)、交通與交控 (Traffic and Traffic Control)、通訊 (Communication)、逃生與救援路徑 (Escape and Rescue Routes)、火災防護 (Fire Protection)、通風系統 (Ventilation System) 以及緊急事件管理 (Emergency Management) 八大類，各類所佔權重，即對安全的相對影響程度如表 8 所示，其中以火災防護所佔比例最高，達 18.8 %。由此可見，火災對隧道行車安全的威脅最大，其防護的能力益顯重要。

表 8 所列安全評估項目與權重係由 EuroTAP 計畫相關執行單位，如德國 DMT (Deutsche Montan Technologie GmbH)、ADAC、BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen) 以及英國 The AA Motoring Trust 等，依據歐洲各隧道設施特性資料與歷年死傷人數資料加以決定，並確定其給分範圍。截至 2005 年為止，該計畫每年均會對項目的名稱、內容與配分進行檢討與調整，表 8 所列係以 2005 年所提出之年度報告為依據。

上述八項安全類別之下，依其相關措施與設施的多寡，又再細分為總數達 172 項之安全參數，並依達成準則要求的程度逐項給予評分，而後將之加總即為總安全得分數 (TSP)。表 9 列舉其中部份安全參數項目及其所配得之最高安全分數 (Max. Safety Points)，例如停車彎布設間距 (Distance between Lay-bys) 最高得分為 40 分，緊急電話及滅火器布設間距 (Distance between Emergency Telephones/Fire Extinguishers) 則最高可得 20 分。

表 8 安全潛勢權重 (EuroTest, 2005)

安 全 類 別	權 重 (%)
隧道系統	14.4
照明與電力	7.8
交通與交控	16.3
通 訊	10.7
逃生與救援路徑	13.8
火災防護	18.8
通風系統	11.3
緊急事件管理	6.9
合 計	100.0

表 9 安全參數最高安全分數 (Tetzner, 2005)

最高安全分數	安 全 參 數 項 目
60 分	● 交通型態 ● 緊急出口佈置間距
40 分	● 車道寬 ● 停車彎布設間距 ● 通風區段長度/排煙時之排風量
20 分	● 局部故障時確保電力之供應 ● 有隧道監控中心 ● 隧道全線無線電交通廣播 ● 緊急電話及滅火器布設間距 ● 通風設備具抗高溫能力

以上所述單項安全參數，其評分的方式主要分為設備狀態有無 (Yes or No Decisions) 與物理性參數評價 (Assessment of Physical Parameters) 兩種，分別說明如下：

一、設備狀態有無

此類安全參數，其評分方式是以形態有無作為區分。若符合要求，將獲得所有的配分，否則不給予任何分數。以下為其中幾項範例：

- 1.路面狀況良好 (Road Surface in Good Condition)
- 2.具有備用電源供應 (Redundant Energy Supply)
- 3.使用柵欄封閉隧道 (Tunnel Closure with Barriers)

二、物理性參數評價

此類安全參數可以量化並表達其程度的大小，例如長度 (Length)、距離 (Distance)、寬度 (Width)、時間 (Time)、流率 (Flow Rate) 等。評分方式為設定上、下限值與門檻值 (Threshold Value)，超過上限值將獲得所有的配分，低於下限值則得零分，而介於上、下門檻值之間者，則依各項安全參數的相關對應圖加以求取分數；而門檻值為歐盟所建議之最低安全標準，至少須滿足此一標準始符合安全的要求。茲以停車彎 (Lay-bys) 與緊急電話 (Emergency Phone) 兩項為例，概略說明其評分方法如下：

(一) 停車彎安全分數評估

圖 4 以停車彎佈設間距作為評估其安全分數的依據。由圖可知，本項得分必須超過 20 分，即其佈設間距必須小於門檻值 1,000 m，方符合目前歐盟的規範。佈設間距如超過 1,400 m，其安全得分數將降為 0 分，而佈設間距小於 600 m 時，將可獲得最高配分 40 分。

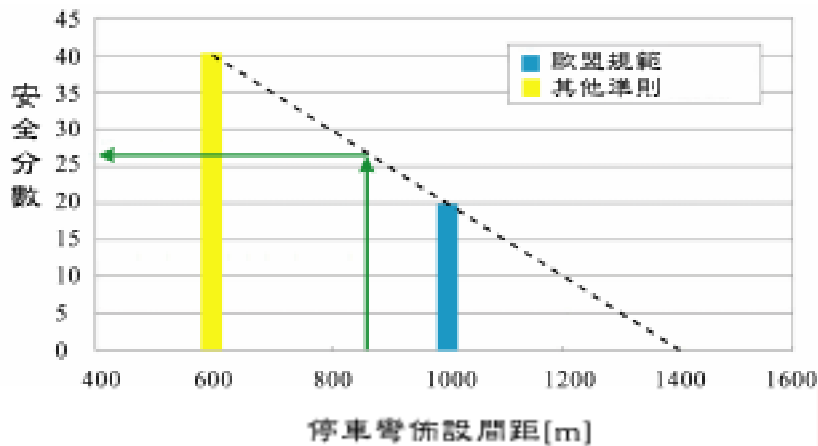


圖4 停車彎佈設間距與安全分數對應圖 (Tetzner, 2005)

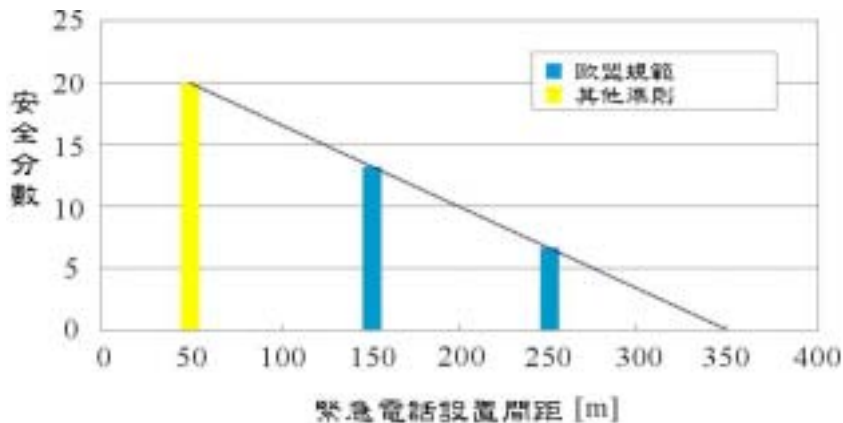


圖5 緊急電話設置間距與安全分數對應圖 (Tetzner, 2005)

(二) 緊急電話安全分數評估

緊急電話同樣是以佈設間距作為評分的依據，且彼此間呈線性關係。圖 5 說明在歐盟規範中，緊急電話設置間距分別是以 150 m 及 250 m 作為其兩組安全門檻值。當設置間距低於 50 m 時，得最高安全分數 20 分；若間距超過 350 m，則安全分數降為 0 分。歐盟雖在此一項目中設定兩組安全門檻值，但建議以 150 m 作為標準。若考量現場條件或其他綜合因素，使設置間距無法滿足 150 m 的要求時，可彈性允許其介於 150 m 與 250 m 之間；但須加註歐盟所要求的項目或技術評估判斷於分析報告後，始符合安全的要求，並對照圖 5 加以配分。

五、案例分析

本節引用 EuroTAP 針對歐洲某一全長 1.1 km，速限 80 km/h 且禁止危險物品運送之單孔雙向雙車道隧道所做測試案例，說明隧道安全評估的過程。茲依據圖 1 所示流程逐一說明如下：

步驟 1：風險潛勢（RP）評估

首先針對表 2 所列七項風險參數進行風險評分。經資料蒐集後得知，此一隧道之縱向坡度最大為 4 %，無重車通行，平均每日交通量（DTV）為 3,000 veh/d。由 DTV 資料可計算出此隧道的交通績效約為每年 1.2 百萬車公里（3,000 veh/d×1.1 km×365 d/yr.），車流量為每日每車道 1,500 輛（3,000 veh/d/2l）。

經查表得知，交通績效每年 1.2 百萬車公里時，其風險分數為 1 分（見表 3）；平均每日交通量（DTV）1,500 veh/d/l 時，其得分則為 0 分（見表 5）。因無重車通行，且禁止危險物品運送，故在重車交通績效及危險物品運送兩項之得分均為 0 分。但此一隧道為單孔雙向通行，故在交通型態一項得最高風險分數 8 分。此外，最大縱向坡度達 4 %，亦得最高風險分數 3 分（見表 6）。因隧道內無特殊狀況，故其他部分無得分（見表 7）。

將以上評估所得分數分別填入表 10 第 2 欄案例狀況（Example Situation）所對應之欄位中，而後加總得風險總分（Total Risk Points）13 分，如第 3 欄所示。

表 10 風險參數與風險分數評估案例

風 險 參 數	案 例 狀 況	風險得分
交通績效	1.2 million veh-km/yr.	1
重車交通績效	0 %	0
交通型態	雙向通行	8
交通量	1,500 veh/d/l	0
危險物品運送	禁止	0
縱向坡度	4 %	3
其 他	—	1
風 險 總 分		13

完成風險參數評分之後，接著進行風險比率因子（RRF）的轉換。因風險總分介於 1 與 29 之間，故透過式（2）之線性式進行轉換得風險比率因子值為 0.77，其計算如下：

$$RRF = \frac{1}{70} \cdot \text{Risk Points} + \frac{41}{70} = \frac{13}{70} + \frac{41}{70} = 0.77$$

步驟 2：安全潛勢（SP）評估

風險潛勢評估完成之後，接著為安全潛勢的評估。計算安全潛勢之前，須先完成表 8 所列八類安全項目的總評分，而每一類安全項目的總得分，又為其下所屬各安全參數得分的總和（各細項評分詳見附錄）。表 11 為經評估加總後所得之總分，其中第 2 欄為隧道實際之安全得分，第 3 欄則為每一項目之最高配分。由表可知，本案例中之隧道，其安全總得分經各項分數加總之後得 1,130.6 分，將其代入式（3）計算得安全潛勢值為 70.88 % 如下：

$$SP = \frac{TSP}{TMSP} \times 100\% = \frac{1130.6}{1595.0} \times 100\% = 70.88\%$$

表 11 安全項目評分表

安全類別	實得安全分數	最高安全分數
隧道系統	130.0	230
照明與電力	112.5	125
交通與交控	248.2	260
通訊	106.7	170
逃生與救援路徑	158.1	220
火災防護	186.7	300
通風系統	118.4	180
緊急事件管理	70.0	110
合計	1,130.6	1,595

步驟 3：計算分級百分比

風險潛勢與安全潛勢分別評估完成後，接著計算分級百分比，以作為隧道安全分級的依據。將上述所得安全潛勢值與風險比率因子值分別代入式（1），得本案例隧道的分級百分比為 92.05 %如下：

$$\text{分級百分比} = \frac{SP}{RRF} = \frac{70.88}{0.77} = 92.05\%$$

步驟 4：隧道安全分級

最後參照表 1 的安全分類標準，得知此隧道的安全等級為「優」（ ），表示其安全性極高。本案例所示隧道雖為單孔雙向運行，風險相對提高，但因交通量不大，且無重車及危險物品通行，加上安全防護能力不錯，故整體評估結果安全性極高。

表 12 安全潛勢各類別得分要求（Tetzner, 2005）

安全類別	最高分數	要求範圍*	得分下限 (1,000~3,000m)	得分下限 (≥3,000m)
隧道系統	230	129 ~ 143	135	135
照明與電力	125	70 ~ 78	90	90
交通與交控	260	146 ~ 162	100	165
通訊	170	95 ~ 106	70	115
逃生與救援路徑	220	123 ~ 137	140	145
火災防護	300	168 ~ 187	135	145
通風系統	180	101 ~ 112	90	130
緊急事件管理	110	62 ~ 69	105	90
合計	1,595	893 ~ 994	865	1,015

*考慮一般可接受程度及中等潛在風險

- 風險潛勢：風險比率因子（RRF）介於 0.80 與 0.89 之間即屬適中（其值愈低愈佳）。
- 安全潛勢：至少須介於 56 至 62%之間方可接受（其值愈高愈佳）。

六、未來發展趨勢

以上主要針對隧道安全評估方法的內容進行探討，尚未對評估結果的意義進行分析，故究竟何種評估或評分的結果可以接受，仍有待進一步的研究。有鑑於此，歐盟 EuroTest 組織自 2005 年起針對此一課題提出初步的構想，建議未來所有隧道的整體安全評估結果皆須達可

(acceptable)級以上，即其分級百分比須達 70%以上。此外，EuroTest 亦分別針對風險潛勢(RP)與安全潛勢(SP)界定其適當的接受範圍如下：

為便於尋找隧道仍可改善的空間，EuroTest 依照上述要求，回溯總評估結果至各單項類別，建立安全潛勢各類別可以接受的得分要求如表 12 所示。表中第三欄是在一般可接受程度及中等潛在風險的考量下，所要求的安全得分範圍；而第四與第五欄則係以隧道長度 3,000m 作為分界點，所訂定之安全得分下限值。

參照上述方式，可進一步追溯評分的源頭，訂定各類別所屬安全參數之安全分數要求。以表 12 中之隧道系統及逃生與救援路徑兩類為例，分別建立其下各細項之安全得分下限值（仍以隧道長度 3,000 m 作為區分）如表 13 與 14 所示。實際應用時，以未達最低要求（下限值）之項目作為改善的優先對象。

表 13 隧道系統各項目得分要求 (Tetzner, 2005)

安全參數項目	最高分數	得分下限 (1,000~3,000m)	得分下限 (≥3,000m)
每一方向隧道孔數	50	0	0
車道寬	40	40	40
隧道前車道縮減	20	20	20
停車彎佈設間距	40	20	20
隧道兩側對立設置停車彎	10	0	0
停車彎面積	10	5	5
隧道兩側設置緊急人行步道	5	5	5
緊急人行步道寬度	10	5	5
緊急人行步道與車道分離	5	5	5
隧道壁外觀明亮	10	0	0
附加措施	30	30	30
合計	230	135	135

表 14 逃生與救援路徑各項目得分要求 (Tetzner,2005)

安全參數項目	最高分數	得分下限 (1,000~3,000m)	得分下限 (≥3,000m)
緊急出口佈設間距	60	35	35
緊急出口充分標示	25	25	25
逃生通道防煙進入	10	10	10
逃生門具相當足夠防火時間	10	10	10
隧道內逃生通道標示	20	12.5	12.5
火災緊急照明	25	17.5	17.5
救援人員可由外部抵達現場	10	10	10
車行救援通道設置間距	10	5	5
小客車及重車迴轉可能性	10	5	10
隧道入口前迴轉可能性	10	0	0
外部逃生通道安全且有照明	10	10	10
附加措施	20	0	0
合計	220	140	145

EuroTest 雖試圖詳盡訂出各安全項目的最低得分要求，以作為尋找風險根源及改善優先順序之依據；然而安全參數項目總數達 172 項之多，若多個項目評估未達標準，則在改善效益為最大但資源有限之目標下，將產生數量龐大的可行改善組合方案，難以使用所建立的表格逐一評分搜尋最佳改善方案，造成實務運用上的不便。因此，如何建立簡單易操作的數學模式作為搜尋最佳改善方案的方法，將成為下一階段研究的方向之一。

七、結論與建議

公路長隧道最重要的課題為其行車的安全，而隧道行車是否安全，則可根據主、客觀條件及其實質設施與防範措施加以評估。本研究循此方向，參酌先進國家的方法與技術，建立一全面性之整合式公路隧道安全評估方法如下：

1. 由文獻回顧可知，過去公路隧道安全方面的研究多針對隧道內可能發生的重大事故及風險進行分析與改善，直到 1999 年歐洲連續發生多起重大公路隧道交通事故之後，全面性的安全評估才引起廣泛的重視與探討。而歐盟更自 1999 年起成立專責機構 EuroTest 推動 EuroTAP 專案計畫，發展並建立隧道安全評估的方法；同時計畫以 7 年的時間，針對歐盟境內 30~50 座重要公路隧道逐年完成安全檢測，其所採用的觀念與方法即為針對隧道整體，而非個別項目進行全面性的評估。
2. 隧道行車安全分析一般分為安全技術現況評估、危險物品運送風險分析以及非危險物品運送安全分析三大類，本研究針對個別隧道孔，由風險與安全兩個角度切入，將上述三類安全分析結果整合成為單一指標，其中風險泛指所有人、車曝露在隧道中可能引發的潛在危險，包括上述危險物品運送風險與非危險物品運送安全兩者，而安全則泛指隧道控管及防護、救援的能力。
3. 本研究依循上述分類原則，由風險潛勢與安全潛勢兩種評估切入，藉由客觀的資料的蒐集與評分，建立隧道安全等級的評估方法，再由評估結果找出影響安全的重要因素，提供相關管理單位作為安全改善的參考。其具體作法為，首先分別建立風險潛勢與安全潛勢兩個指標並給予評分，其次透過轉換及尺度整合，將兩者合成為單一指標-分級百分比，最後再由分級百分比進行安全分級，評定隧道的安全等級。為驗證此一方法可行，並以實例進行個案分析。

本研究另針對隧道安全評估提出以下的建議：

1. 目前台灣地區運轉中的公路隧道已達 200 餘座，其中部份已有二、三十年的歷史，而四、五十年者亦不在少數，其行車是否符合現行世界的安全標準，實有待進一步的評估與確認。因此建議相關主管單位，參考橋樑管理系統的方式，以長遠的眼光來看，建構一客觀的隧道安全評估方法，並對國內隧道進行全面性的體檢，找出影響安全的因素進行改善，以保障用路人的安全。
2. 眾所矚目的雪山隧道已開放通車，其行車安全受到高度的重視。由於雪山隧道工程長達十餘年，當年在安全方面所做的設計是否仍符合現今世界先進國家的要求標準，則有待進一步的評估。基本上雪山隧道的行車安全可分為兩個層面來看，一是如何就現有資源（含設施及人力）與救援能量規劃出最佳的控管方式與防救災方案；另一則是針對未來研擬進一步提升安全、降低風險的改善措施，而是否仍有改善的空間，且其標的為何，

則有待先行的評估，故評估方法的建立極為迫切，因此建議相關單位立即著手進行此方面的研究。

3. 近年來歐盟雖已建立隧道整體安全評估的方法，然而其評分項目多達 172 項，若其中若干項目未達最低要求標準，則在改善效益為最大但資源有限的目標下，將產生大量的可行改善方案，難以使用表格逐一評分搜尋最佳方案，造成實務運用上的不便。因此，如何建立簡單易操作的數學模式進行最佳改善方案的搜尋，可作為後續研究的方向之一。

八、參考文獻

1. 王進輝，「公路隧道運送危險物品之風險研究」，國立中央大學土木工程學系碩士論文（1998）。
2. 吳健生、周健捷，「公路隧道安全設施準則研訂」，交通部台灣區國道新建工程局（1998）。
3. 吳健生、洪玉美，「隧道交控電腦輔助規劃系統之研究」，八十四年電子計算機於土木水利工程應用論文研討會（1995）。
4. 吳健生、婁自強，「北宜高速公路雪山隧道成立消防隊評估及救災指揮體系方案隧道交控電腦輔助規劃系統之研究」，交通部國道高速公路局北區工程處（2004）。
5. 邱豪磊，「台灣公路隧道安全管理與風險評估之研究」，中華大學科技管理研究所碩士論文（2002）。
6. 周胤德、忻元發、張世忠，「從近年國內外之重大公路長隧道事故探討隧道營運管理安全設施策略」，臺灣公路工程第三十卷第七期，pp2-13（2004）。
7. 郭富森，「公路隧道通風與交通控制整合研究」，國立中央大學土木工程學系碩士論文（1998）。
8. 楊冠雄、吳健生，「公路隧道機電及交通監控整合研究」，交通部台灣區國道新建工程局（1995）。
9. 劉鈺文，「長公路隧道火災事故用路人疏散方案績效評估-以雪山隧道為例」，國立中央大學土木工程學系碩士論文（2005）。
10. 簡賢文，「公路隧道防災及救援之探討」，交通部台灣區國道新建工程局（1998）。
11. Dieter Tetzner (2005), "European Tunnel Test – Methodology and Assessment", DMT, Meeting CEDR Paris.
12. EuroTest (2005), "Making Europe's road tunnels safer for users – the European Tunnel Assessment Program (EuroTAP) 2005 Inspections", EuroTAP, The AA Motoring Trust.
13. EuroTest (2003) (2002) (2000), "EuroTest 2003 tunnel tests – safety of road tunnels in Europe", EuroTAP, The AA Motoring Trust.
14. EuroTest (2005), "EuroTAP Tunneltest List of Criteria 2005", EuroTAP, A DAC.
15. EuroTest (2005), "EuroTAP Tunnel Test 2005 Methodology", EuroTAP, A DAC.
16. EuroTest (2005), "Evaluation Example", EuroTAP, A DAC.
17. European Union (2004), "Corrigendum to Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network", Official Journal of the European Union, pp56-76.
18. The World Road Association - PIARC (2005), "Annual report October 2004 - September 2005", PIARC Report, CO-0510-03E, La Défense Cédex, France, pp1-15.
19. Von Alex Scheiwiller (2003), "Beurteilung der Tunnelsicherheit", SSI-Bulletin.

附錄安全項目案例分析

隧道系統							
項次	安全參數	單位	資料	標準	(最大-最小)	最高分	評分
1.1	隧道孔數 每一方向隧道孔數		1 0.5	≥ 1		50	0
1.2-a	每一孔隧道車道數		2				
1.2-b	車道寬	m	3.5	3.50	2.50	40	40.0
1.2-c	隧道前車道縮減		1			20	20
1.3-a	隧道全線設置停車道		1			10	10
1.3-b	停車道寬	m	1.3	2.00	1.50	40	0.0
1.3-c	停車道淨高	m	5.1	4.50		10	10
1.4-a	有停車彎		0				
1.4-b	停車彎-佈設間距	m		600	1,400	40	0.0
1.4-c	停車彎-隧道兩側對立設置					10	0
1.4-d	停車彎-長度	m					
1.4-e	停車彎-寬度 停車彎-面積	m ² m ²		100	50	10	0.0
1.5-a	緊急人行步道-隧道兩側設置	m	1			5	5
1.5-b	緊急人行步道-寬度	m	1.00	1.00	0.5	10	10.0
1.5-c	緊急人行步道-與車道分離		1			5	5
1.6	隧道壁面著亮光漆		0			10	0
	附加措施					30	30
1.7-a	隧道入口設計-減速波紋		0			5	0
1.7-b	隧道入口設計-防撞設施/安全護欄		1			10	10
1.8-a	路面明亮		0			5	0
1.8-b	路面平整狀況正常		1			10	10
1.9	出隧道前路段線形彎曲		0			10	0
1.10	隧道乾燥		1			10	10
	合計					230	130
照明與電力							
項次	安全參數	單位	資料	標準	(最大-最小)	最高分	評分
2.1	隧道全線照明		1			10	10
2.2	有調光式照明		1			10	10
2.3	晝間車道輝度	cd/m ²	4	6	0	20	13.3
2.4	有緊急照明		1			10	10
2.5	電力輸送(迴路/雙獨立線路)		1			20	20
2.6	局部故障時確保電力之供應		1			20	20
2.7-a	有不斷電系統		1			5	5
2.7-b	不斷電系統持續時間	分	25	60	0	10	4.2
2.7-c	切換至不斷電系統時電力不中斷		1			10	10
	附加措施					10	10
2.8-a	照明評估-隧道孔明亮		1			5	5
2.8-b	照明評估-無反光面		1			5	5
2.8-c	照明評估-車道照明均勻		1			5	5
2.8-d	照明燈具乾淨/正常		1			5	5
2.9	停車彎照明顯著		0			5	0
	合計					125	112.5
交通與交控							
項次	安全參數	單位	資料	標準	(最大-最小)	最高分	評分
3.1	交通型態		雙向	單向	雙向		
3.2	極少出現擁塞		1			20	20
3.3-a	有隧道監控中心		1			20	20
3.3-b	隧道監控中心常駐人員		1			10	10
3.3-c	隧道監控中心進駐人員受過訓練		1			5	5

3.4-a	危險物品運送-禁止		1			20	20
3.4-b	危險物品運送-限制					5	0
3.4-c	危險物品運送-向隧道監控中心通報					5	0
3.5	車輛自動偵測		1			10	10
3.6	擁塞自動偵測		1			10	10
3.7-a	隧道全線完整監視		1			10	10
3.7-b	閉路電視攝影機佈設間距	m	100	75	350	20	18.2
3.7-c	事件發生時資料自動存檔		1			10	10
3.8	進入隧道前實施交通控制		1			10	10
3.9-a	以隧道入口前之交通燈號封閉隧道		1			10	10
3.9-b	以隧道中之交通燈號封閉隧道	m	300	300	1,200	10	10
3.9-c	隧道入口前設機械式柵欄		1			10	10
3.9-d	封閉隧道時提供相關訊息		1			10	10
3.10-a	隧道標誌		1			5	5
3.10-b	停車彎指示標誌		0			5	0
3.10-c	速率限制		1			5	5
3.10-d	間距指示標誌		1			5	5
3.10-e	改/繞道指示標誌		0			5	0
3.11-a	分向標線及標記（雙向通行時）		1			10	10
3.11-b	車道右緣標線		1			10	10
	附加措施					30	30
3.12	假日隧道不擁塞		1			5	5
3.13	重車特別措施		1			10	10
3.14	較開放路段有更多之速率限制		1			10	10
3.15	危險物品自動辨識		0			5	0
3.16	跟車距離/速度之監視		0			5	0
3.17	停車彎/停車道使用時自動通報		1			5	5
3.18	車輛高度管制		1			10	10
3.19	隧道內設機械式柵欄		0			5	0
3.20	隧道內設可變交通標誌		1			5	5
3.21	交通標誌清潔		1			5	5
3.22	路面標線完好		1			5	5
	合計					260	248.2
	通訊						
項次	安全參數	單位	資料	標準	(最大-最小)	最高分	評分
4.1-a	隧道入口裝設擴音器		1			10	10
4.1-b	逃生出口/停車彎裝設擴音器		1			10	10
4.2-a	隧道全線無線電交通廣播		0			20	0
4.2-b	進入隧道時提示無線電交通廣播		0			5	0
4.2-c	路況報導插播		0			10	0
4.3-a	緊急電話-每一行車方向均設置		1			5	5
4.3-b	緊急電話-佈設間距	m	100	50	350	20	16.7
4.3-c	緊急電話-標誌指示		1			10	10
4.3-d	緊急電話-有不斷電系統/外表著色		0			5	0
4.3-e	緊急電話-作用正常		1			10	10
4.3-f	緊急電話-有隔音間		0			10	0
4.3-g	緊急電話-使用時啟動信號		0			5	5
4.3-h	緊急電話-使用時自動啟動閉路電視攝影機監視		1			10	10
4.4-a	隧道無線電廣播-操作人員		1			10	10
4.4-b	隧道無線電廣播-消防隊/救援服務		1			10	10
4.4-c	隧道無線電廣播-交通警察		1			10	10
	附加措施					10	5
4.2-d	全時段路況報導插播		0			5	0
4.2-e	多國語言路況報導廣播		0			5	0
4.2-f	隧道內標示無線電廣播頻道		0			5	0

4.3-i	緊急電話使用時自動調降速限		0			5	0
4.5	可撥接行動電話		5			5	5
4.6	外語通訊		0			5	0
	合計					170	106.7
	逃生與救援路徑						
項次	安全參數	單位	資料	標準	(最大-最小)	最高分	評分
5.1	其他逃生通道		NR				
5.2-a	緊急出口-佈設間距	m	300	100	1,000	60	46.7
5.2-b	緊急出口-充分標示		1			20	20
5.2-c	緊急出口-有不斷電系統/外表著色		1			5	5
5.2-d	逃生通道防煙進入		0			10	0
5.2-e	逃生門具相當足夠防火時間		0			10	0
5.3-a	隧道內逃生通道充分標示		1			5	5
5.3-b	逃生通道標示間距	m	50	25	80	15	8.2
5.4-a	隧道內逃生通道有緊急照明		1			5	5
5.4-b	緊急照明佈設間距	m	50	25	80	15	8.2
5.4-c	逃生緊急照明有不斷電系統		1			5	5
5.5-a	救援人員可由外部抵達現場		1			10	10
5.5-b	車行救援通道設置間距	m	300	500	1500	10	10
5.6-a	小客車迴轉可能性		1			5	5
5.6-b	重車迴轉可能性		0			5	0
5.7	隧道入口前迴轉可能性(單向交通時)					10	0
5.8	外部逃生通道安全且有照明		1			10	10
	附加措施					20	20
5.2-f	逃生通道通風分離		1			5	5
5.2-g	緊急出口額外照明		1			10	10
5.9	逃生指示標誌		0			5	0
5.10	無另外出口之避難坑			≤500		10	0
5.11	逃生出口無障礙		1			5	5
	合計					220	158.1
	火災防護						
項次	安全參數	單位	資料	標準	(最大-最小)	最高分	評分
6.1-a	隧道壁防火保護		0			10	0
6.2	電纜線防火		1			10	10
6.3-a	滅火器-佈設間距	m	100	50	350	20	16.7
6.3-b	滅火器-保養正常		1			10	10
6.3-c	滅火器-使用時啟動信號		0			5	0
6.3-d	滅火器-自動啟動閉路電視監視		1			10	10
6.4-a	火警通報-自動(線性通報器等等效線性通報器)		1			30	30
6.4-b	可確認起火位置(≤50m)		1			10	10
6.5	火警通報-可手動通報		1			10	10
6.6-a	隧道全線敷設消防加壓水管		1			10	10
6.6-b	消防栓-佈設間距	m	50	100	350	20	20.0
6.6-c	消防蓄水池	m ³	300	120	20	10	10.0
6.7-a	自動灑水系統		0			10	0
6.7-b	自動灑水系統-灑水管佈設間距	m		50	150	20	0.0
6.7-c	自動灑水系統-50m 區間出水量	l/s		100	50	10	0.0
6.7-d	自動灑水系統-備援蓄水量	m ³		160	30	10	0.0
6.8-a	消防隊-出發距離	km	3				
6.8-b	消防隊-抵達火場時間	分	4	10	20	20	20.0
6.8-c	消防隊-隧道內訓練	月		12	60	10	0.0
6.8-d	消防隊-消防車		1			10	10
6.8-e	消防隊-防護裝備		1			5	5
6.8-f	消防隊-熱影像攝影機		1			5	5

6.8-g	消防隊-呼吸保護裝備作用時間	h	0.5	2	0.5	10	0.0
	附加措施					35	10
6.1-b	隧道特殊防火襯壁		0			10	0
6.3-e	滅火器-自動封閉隧道		0			5	0
6.4-c	早期火警偵測（空氣濁度、影像、其他等效設備）		1			10	10
6.4-d	定點火警通報（一氧化碳、空氣濁度、影像）		0			10	0
6.6-d	隧道兩側消防供水		0			5	0
6.6-e	其他消防用水供應		0			10	0
6.8-h	消防隊-在真實狀況下訓練		0			5	0
6.9	供隧道用人使用之其他滅火系統		0			10	0
	合計					300	186.7

通風系統							
項次	安全參數	單位	資料	標準	(最大-最小)	最高分	評分
7.1-a	機械式通風稀釋車輛所排廢氣（可調控）		1			10	10
7.1-b	自動監測與控制通風（可調控）		1			5	5
7.2-a	特殊火災通風操作模式		1			10	10
7.2-b	可控制縱向氣流方向		1			10	10
7.2-c	通風系統可控制縱向氣流大小		1			5	5
7.3	通風設備具抗高溫能力		1			20	20
7.4-a	系統做過火災實測		0			10	0
7.4-b	系統做過氣流量測與煙霧測試		0			10	0
7.5-a	火災狀況下之通風系統		縱流式		縱流式/半橫流式/橫流式		
7.5-b	通風區段-數目		1				
7.6-a	通風區段-長度	m	1,073	500	3,500	40	32.4
7.6-b	最大可達風速	m/s	3	3.5	1	20	16.0
7.6-c	氣流（煙霧）順車流方向流動		0			30	0
7.6-d	風機可逆向運轉		1			10	10
7.7-a	排煙時之排風量	m ³ /s		150	50	40	0.0
7.7-b	可改變縱向氣流					10	0
7.7-c	無逆轉氣流需要					10	0
7.7-d	加大火災範圍內排氣口					10	0
7.7-e	關閉火災範圍外排氣口					30	0
	合計					180	118.4

緊急事件管理							
項次	安全參數	單位	資料	標準	(最大-最小)	最高分	評分
8.1-a	有警報與救援計畫		1				
8.1-b	-警報示意圖		1			10	10
8.1-c	-改/繞道路徑		1			5	5
8.1-d	-隧道監控人員操作準則		1			10	10
8.1-e	-事件評估計畫		0			5	0
8.1-f	-殘障者特定措施		0			5	0
8.1-g	更新警報與救援計畫		1			10	10
8.2-a	自動啟動火災通風模式		半自動	全自動	半自動	10	5
8.2-b	火災時自動封閉隧道		半自動	全自動	半自動	10	5
8.2-c	自動通報警示消防隊行動		半自動	全自動	半自動	10	5
8.3-a	定期舉行緊急事件演習	月		12	60	10	0.0
8.3-b	-證明文件					5	0
8.4-a	定期訓練人員		1			10	10
8.4-b	-證明文件		1			5	5
8.5	維修計畫		1			5	5
	合計					110	70.0