

出國報告（出國類別：研究）

地震即時預警系統及長隧道防災應用 於臺灣鐵路之研究

服務機關：交通部鐵路改建工程局

姓名職稱：工務組

工程司 游獻章

派赴國家：日 本

出國期間：103 年 5 月 28 日至 103 年 8 月 24 日

報告日期：103 年 11 月 13 日

103 年度交通部選送人員赴國外專題研究 建議事項研議情形追蹤表

填表日期：103.11.13

專題研究名稱：地震即時預警系統及長隧道防災應用於臺灣鐵路之研究				
出國人員姓名	服務機關		單位/職稱	
游獻章	交通部鐵路改建工程局		工務組/工程司	
研究期間：103 年 5 月 28 日至 103 年 8 月 24 日 研究國家：日 本				
選送赴國外專題研究確有助於強化出國人員業務推動之具體事例：(以 500 字為限) 本次研究具業務有關資料如下： 1. 歐洲阿爾卑斯山計畫基線隧道（山岳隧道）、日本青函隧道及英法隧道（海底隧道），有關通風、排水、火災防制、防災等設施之安全概念及建置情形。 2. 鐵路隧道「風險評估程序」。 3. 鐵路隧道「單孔雙軌」及「雙孔單軌」兩種斷面形式，使用案例。 4. 鐵路隧道「內部直徑」使用案例。 5. 鐵路隧道「橫向通道間距」使用案例。 6. 鐵路隧道「救援車站數量及間距」及「救援車站通道距離」使用案例。 上述有關資料，實有助於鐵路隧道工程業務之推動。				
建議事項	建議內容 (請擇要簡述， 並以 50 字為限)	業務相關 機關(單位)	執行 情形	說明 (建議事項未採行者，請簡述原因；並敘明後續管考建議)
	日本發展地震預警系統(JMA-EEW)，已具發布預報及警報功能，值得學習，建請參酌。	交通部 中央氣象局	☐ 已採行 ☐ 研議中 ☐ 未採行	
	JR 東日本針對豪雨，建置之鐵路沿線邊坡預警系統，係採取 1.5 時、6 時、24 時最佳半衰期之有效累積雨量臨界值，取代傳統「時雨量」及「連續雨量」之警報方式，建請參考。	交通部臺灣 鐵路管理局	☐ 已採行 ☐ 研議中 ☐ 未採行	
	長隧道防災規劃			

	針對「單孔雙軌」及「雙孔單軌」兩種斷面形式之選定議題，日本及歐洲國家，見解相異。建請視執行計畫地形、地質、經費、防災等相關因素審慎決定。	交通部鐵路改建工程局	☐ 已採行 ☐ 研議中 ☐ 未採行	
	規劃階段考量所需豎井、斜坑、主隧道、橫向通道、緊急車站（含列車火災紅外線熱度偵測設備）等工項，於施工中及營運後所具之角色及防災避難功能，對於防災體系之建置，極為關鍵，建請參酌。	交通部鐵路改建工程局	☐ 已採行 ☐ 研議中 ☐ 未採行	

備註：執行情形及說明欄係由建議內容有關業務單位填列，出國研究人員毋須填列。

出國報告審核表

出國報告名稱：地震即時預警系統及長隧道防災應用於臺灣鐵路之研究			
出國人姓名 (2人以上，以1人為代表)		職稱	服務單位
游獻章		工程司	交通部鐵路改建工程局
出國類別	☐ 考察 ☐ 進修 ☒ 研究 ☐ 實習 ☐ 其他 (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)		
出國期間：103年5月28日至103年8月24日		報告繳交日期：103年11月13日	
出國人員 自我檢核	計畫主辦 機關審核	審 核 項 目	
☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☒ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☒ ☐ ☒ ☐ ☐	☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐	1.依限繳交出國報告 2.格式完整(本文必須具備「目的」、「過程」、「心得及建議事項」) 3.無抄襲相關資料 4.內容充實完備 5.建議具參考價值 6.送本機關參考或研辦 7.送上級機關參考 8.退回補正，原因： (1) 不符原核定出國計畫 (2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 (3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項 (4) 抄襲相關資料之全部或部分內容 (5) 引用相關資料未註明資料來源 (6) 電子檔案未依格式辦理 9.本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： (1) 辦理本機關出國報告座談會(說明會)，與同仁進行知識分享。 (2) 於本機關業務會報提出報告 (3) 其他 _____ 10.其他處理意見及方式：	
出國人簽章(2人以上，得以1人為代表)		計畫主辦機關 審核人	一級單位主管簽章 機關首長或其授權人員簽章
			

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「[公務出國報告資訊網](#)」為原則。

行政院及所屬各機關公務出國報告提要

頁數 :118 頁含附件:☐ 是 ☒ 否

報告名稱：地震即時預警系統及長隧道防災應用於臺灣鐵路之研究

主辦機關：交通部鐵路改建工程局

聯絡人/電話：王小蓮/02-89691900#1946

出國人員/服務機關/單位/職稱/電話/

游獻章/交通部鐵路改建工程局/工務組/工程司/02-89691900#1957

出國類別：研究

出國期間：103 年 5 月 28 日至 103 年 8 月 24 日

出國地區：日 本

報告日期：103 年 11 月 13 日

分類號目：H1/交通建設

關鍵詞：地震預警系統、邊坡預警、長隧道防災、青函隧道

摘要

鄰國日本地處「歐亞大陸板塊」、「北美洲板塊」、「太平洋板塊」及「菲律賓板塊」四個板塊之交界處，地震和火山活動十分活躍，世界上每年發生之大小地震，約有 10% 都是在日本附近發生。有鑑於此，日本對於地震預警系統、鐵路邊坡預警監控機制、鐵路長隧道防災等議題，全力進行研發及改進現有技術，可供參酌及學習。

（一）地震預警系統

日本自 1995 年「阪神大地震」重創之後，記取慘痛經驗，全力發展地震預警系統。目前氣象廳地震預警系統（JMA－EEW）經測試後，已於 2007 年 10 月正式上線，為全球先進且具精密分析能力之地震預警系統，已具發布預報（forecast）及警報（warning）功能。

另「日本新幹線地震預警系統」亦歷經四代之努力，已發展至 JMA－EEW 系統。偵測 P 波至發布警報之處理時間，並已縮減至 1 秒（如 Compact UrEDA 系統），使新幹線列車可提前採取停車等因應措施。

（二）鐵路邊坡預警監控機制

JR 東日本針對豪雨，建置之鐵路沿線邊坡預警系統，係採取 1.5 時、6 時、24 時最佳半衰期（half life）之有效累積雨量臨界值，取代傳統「時雨量」及「連續雨量」之警報方式，更為準確。

（三）鐵路長隧道防災

藉由青函隧道（Seikan Tunnel）、英法隧道（Channel Tunnel）、阿爾卑斯山計畫（The Alps Transit project）所轄四條基線隧道等工程案例及數據，實際瞭解鐵路長隧道防災體系之建置，所需之安全概念、偵測設備、防災設施及應有之功能。

目 次

壹、派赴人員及研究期程-----	6
貳、本文-----	7
一、目的-----	7
二、過程-----	7
三、研究內容（一）：地震預警系統-----	11
四、研究內容（二）：鐵路邊坡預警監控機制-----	51
五、研究內容（三）：鐵路長隧道防災-----	56
六、心得-----	109
七、建議事項-----	111
參、參考文獻-----	112

圖目錄 (1/3)

圖 1	EEW 地震預警系統概念-----	12
圖 2	EEW 系統發展國家-----	13
圖 3	日本群島周邊地殼板塊-----	15
圖 4	日本 EEW 地震預警系統地震站-----	17
圖 5	JMA EEW 警報發布-----	17
圖 6	日本地震震度分級-----	19
圖 7	地震時安全建議-----	20
圖 8	預報及警報-----	21
圖 9	聯網系統-----	26
圖 10	DPREC 辦公室接收及傳輸 EEW 訊息伺服器-----	27
圖 11	緊急警報傳輸流程-----	28
圖 12	企業建置案例-----	31
圖 13	警報設施案例-----	31
圖 14	第一代 (S 波，沿線檢知系統)-----	33
圖 15	第二代 (S 波，海岸線檢知系統)-----	34
圖 16	第三代【P 波→S 波，沿線及海岸線 (個別地震偵測器)檢知系統】-----	35
圖 17	第四代【P 波→S 波，沿線及海岸線(全部地震偵測器聯線)檢知系統】--	37
圖 18	隨身型 FREQL 使用於四川大地震-----	38
圖 19	偵測 P 波後發布警報處理時間演進史-----	39
圖 20	新世代 (JMA EEW 系統)-----	40
圖 21	東海道新幹線地震預警系統 (架構圖一) -----	42
圖 22	東海道新幹線地震預警系統 (架構圖二) -----	43

圖目錄 (2/3)

圖 23	東海道新幹線地震速報接續處理裝置架構圖-----	44
圖 24	JR 西日本對應地震發生運作示意圖-----	45
圖 25	JR 東日本地震偵測警報系統之發展現況圖-----	46
圖 26	高鐵災害類別圖-----	47
圖 27	高鐵 DWS 示意圖-----	47
圖 28	高鐵地震告警系統-----	48
圖 29	雨量計之設置-----	51
圖 30	EJR 原有因應措施-----	52
圖 31	有效雨量模式圖-----	53
圖 32	最佳半衰期分布圖-----	54
圖 33	3 種半衰期臨界值及警報-----	55
圖 34	監控螢幕實際畫面-----	55
圖 35	單孔雙軌隧道-----	57
圖 36	雙孔單軌隧道-----	57
圖 37	風險評估程序圖-----	64
圖 38	青函隧道位置圖-----	65
圖 39	青函隧道平面及縱斷面圖-----	65
圖 40	青函隧道斷面形式-----	67
圖 41	青函隧道三軌結構-----	67
圖 42	青函隧道主隧道等相對位置圖-----	68
圖 43	青函隧道海底施工系統-----	69
圖 44	青函隧道施工系統斷面圖-----	69

圖目錄 (3/3)

圖 45	青函隧道排水路徑圖-----	71
圖 46	青函隧道排水故障處理圖-----	71
圖 47	青函隧道通風方式圖-----	72
圖 48	火災防制對策及主隧道設備圖-----	73
圖 49	青函隧道避難誘導方法圖-----	73
圖 50	青函隧道列車紅外線檢知裝置 (1) -----	78
圖 51	青函隧道列車紅外線檢知裝置 (2) -----	79
圖 52	青函隧道地震防災設施-----	81
圖 53	青函隧道地震防災設施平面圖-----	82
圖 54	青函隧道監控項目圖-----	87
圖 55	英法隧道地理位置圖-----	94
圖 56	英法隧道斷面型式圖-----	94
圖 57	阿爾畢斯山基線隧道示意圖-----	99
圖 58	里昂-都靈基線隧道圖-----	100
圖 59	布倫納基線隧道圖-----	101
圖 60	聖哥達基線隧道圖-----	102
圖 61	勒奇山基線隧道圖-----	103

表目錄

表 1	阪神大地震日本直接經濟損失分類統計-----	16
表 2	預測地震強度資料統計表（1）-----	22
表 3	預測地震強度資料統計表（2）-----	22
表 4	高鐵地震災害行車限制與標準-----	49
表 5	新幹線與高鐵地震預警系統比較表-----	50
表 6	最佳半衰期分布比例-----	54
表 7	鐵路隧道斷面形式案例-----	58
表 8	鐵路隧道內部直徑案例-----	59
表 9	鐵路隧道橫向通道間距案例-----	60
表 10	鐵路隧道救援車站數量及間距案例-----	61
表 11	鐵路隧道救援車站通道距離案例-----	62
表 12	阿爾畢斯山基線隧道風扇站及風扇動力表-----	105
表 13	阿爾畢斯山基線隧道安全設備表-----	108

壹、派赴人員及研究期程

一、依據

本次專題研究執行計畫奉 鈞部 103 年 5 月 22 日交人字第 10350064991 號函
同意辦理。

二、派赴人員

交通部鐵路改建工程局

工務組

工程司 游獻章

三、前往國家

日 本

四、研究地點

東京大學（The University of Tokyo）

工學院 交通・都市基盤計畫研究室

（TRIP, Transport Research and Infrastructure Planning Laboratory）

五、出國期間

自 103 年 5 月 28 日至 103 年 8 月 24 日止。

貳、本文

一、目的

本次專題研究針對地震預警系統、鐵路邊坡預警監控機制、鐵路長隧道防災等議題，目的如後：

（一）地震預警系統

經瞭解日本氣象廳地震預警系統（JMA－EEW）及新幹線地震預警系統之發展現況，期有助於本議題之參酌應用或進階研究。

（二）鐵路邊坡預警監控機制

期有助於「全線鐵路邊坡預警系統」之建置。

（三）鐵路長隧道防災

提供辦理「鐵路長隧道防災」綜合規劃業務之參考。

二、過程

（一）加入日本東京大學「交通・都市基盤計畫研究室」（簡稱：TRIP, Transport Research and Infrastructure Planning Laboratory）進行本次專題研究。

1. TRIP 研究領域

TRIP 為日本學術界知名研究所，主要研究交通、防災、土木等工程領域，設置有碩士及博士班。碩士及博士班教授課程，均採英文教學。

2. TRIP 教師組成

主 任：教 授 家田仁 (Professor Ieda Hitoshi)

教 授 島村誠 (Professor Shimamura Makoto)

教 授 羽 藤 (Professor Hato Eji)

助理教授 鳩山紀一郎 (Assistant Professor Hatoyama Kiichiro)

助理教授 柳沼秀樹 (Assistant Professor Yaginuma Hideki)

（二）學習課程

1. 天然災害風險管理 (Risk Management of Natural Disasters)

教授 島村誠

2. 國際公共工程專案管理 (Engineering and Project Management in International Infrastructure Construction)

講師 渡邊泰充

（三）參觀訪問

103 年 8 月 5 日及 6 日，參訪「青函隧道」。



照片 1 東京大學正門



照片 2 東京大學第一工學館家



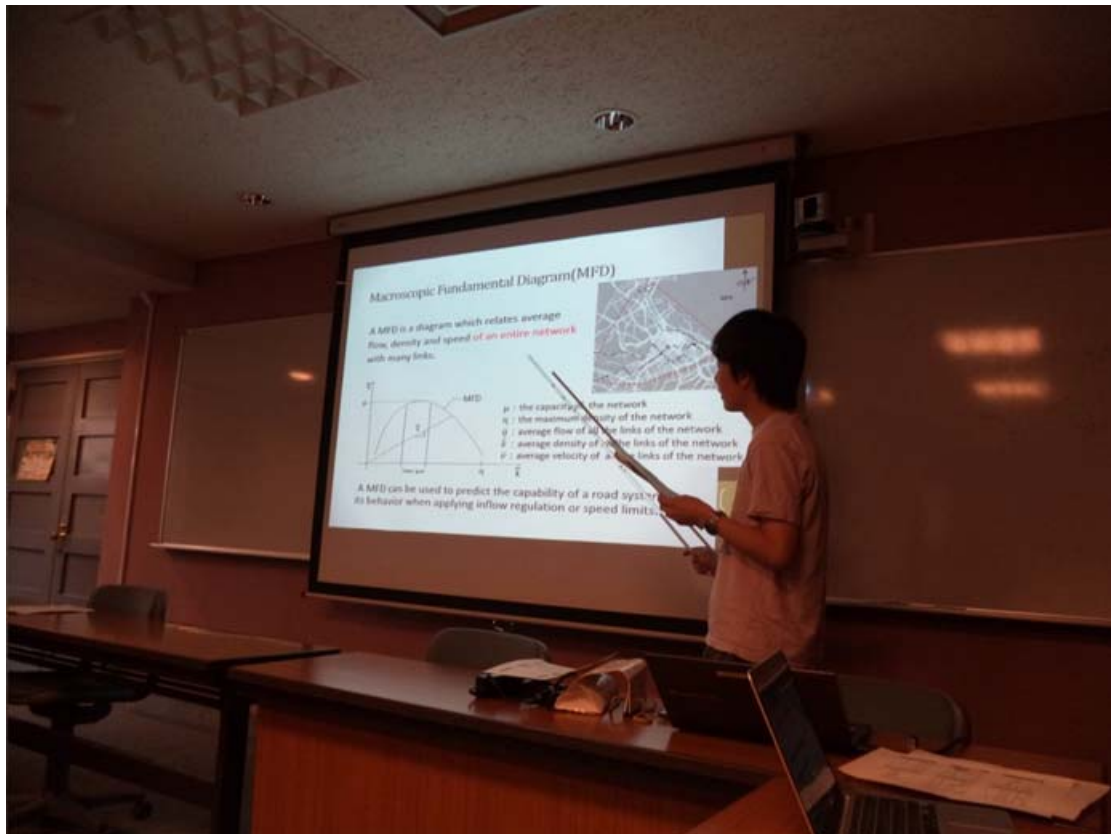
照片 3 東京大學工學院 TRIP



照片 4 TRIP 每周舉行 Seminar



照片 5 TRIP 主任 教授 家田仁(Ieda Hitoshi)



照片 6 TRIP 每周 seminar 論文進度及專題報告

三、研究內容（一）：地震預警系統

（一）地震預警系統原理

地震預警系統（Earthquake Early Warning System）係屬於一種地震減災方法，其概念最早由庫柏（Cooper）博士於 1868 年提出。當一地震發生時，累積之能量釋放，從震源處開始以地震波形式向外傳播，並穿越整個地球內部；地震時天搖地動，即是由到達地表震波晃動所造成。

從震源處開始向外傳遞之彈性波有兩種，其一是 P 波（Primary wave，簡稱 P wave），又可稱為疏密波、壓縮波（Compressional wave）或是縱波（Longitudinal wave）；另一為 S 波（Secondary wave，簡稱 S wave），又可稱為高低波、剪力波（Shear wave）或是橫波（Transverse wave）。此兩種彈性波又可稱為體波（Body wave），因為這兩種波可在地球內部傳遞，此名稱是相對於只侷限在地球近地表傳播之表面波（Surface wave）而言。

當地震發生後，P 波是所有震波種類當中傳遞速度最快，且最早被監測站接收到的波相，也因此，其名字是來自於拉丁文 *primus*，代表「第一」之意思；而重大災害的發生，多是因 S 波及表面波的到來，造成地表強烈晃動。P 波在地殼的傳遞速度大約為每秒 7 公里，於上部地層則大約每秒 8~9 公里；而 S 波在地殼的傳遞速度大概只有每秒 3.5 公里，表面波的波速又更慢了。地震預警系統即是運用此波傳速度之差異特性，來達到提前預警的作用（圖 1）。

如何利用地震剛發生後之初始振動，有效評估地震位置、規模及各地區之震度大小等，即為預警系統中幾個重要課題。這些問題都必須於地震發生後數秒之內立即估算，才能提供出有價值之警報訊息。而在這所有問題之中，架設完整且密布的地震監測網系統，為最首要的工作。

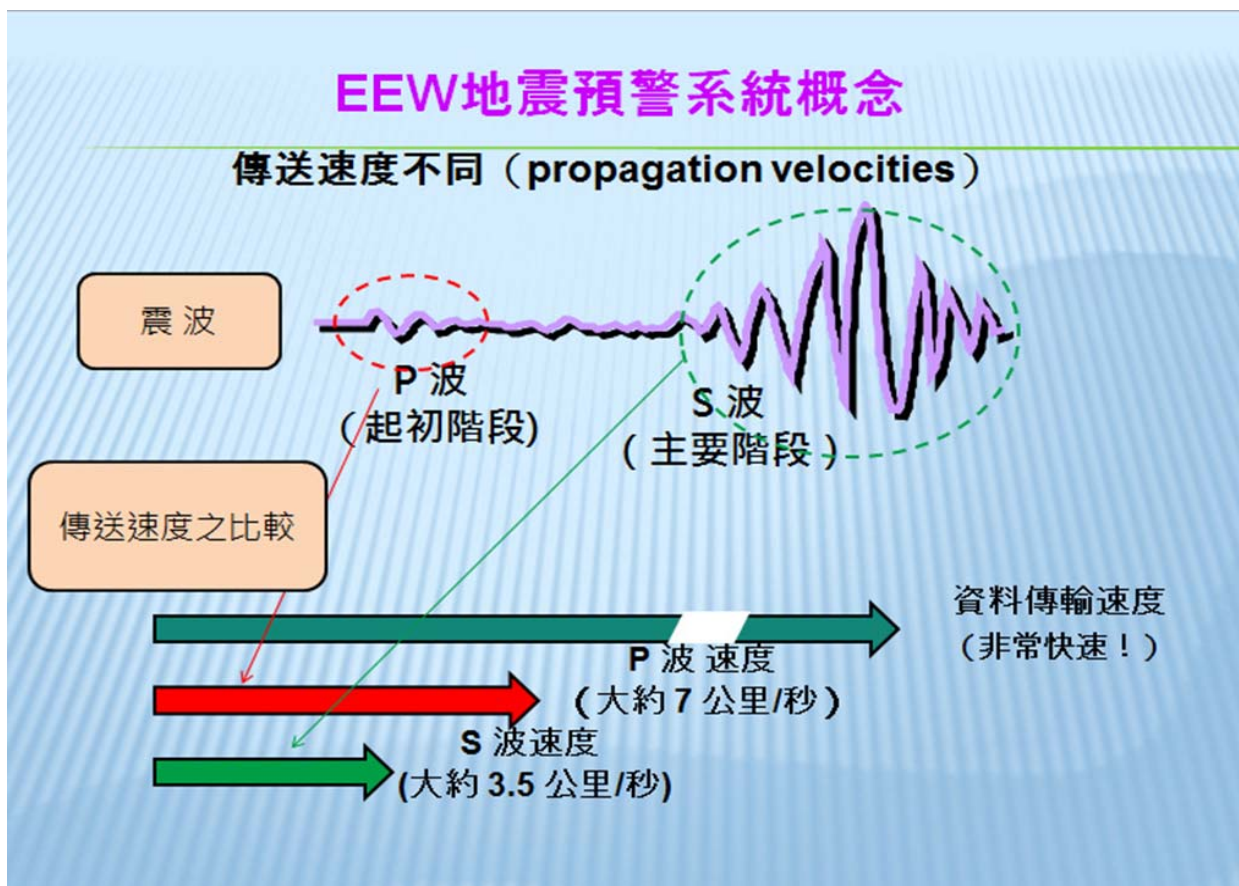


圖 1 EEW 地震預警系統概念

(二) 各國地震預警系統

地震預警系統主要有三大部分，即地震觀測網路 (seismic observation network)、分析系統 (analysis system) 及聯絡系統 (communication system) [1]。對於位處地震帶之國家而言，推動地震預警系統，絕對是當務之急，或許發展之預警系統名稱相異，減少地震危害之立意卻是相同。在這些推動國家之中 (如圖 2)，就屬日本研發之 EEW 系統，為全球最先進且具精密分析力之地震預警系統。

全世界EEW系統發展國家

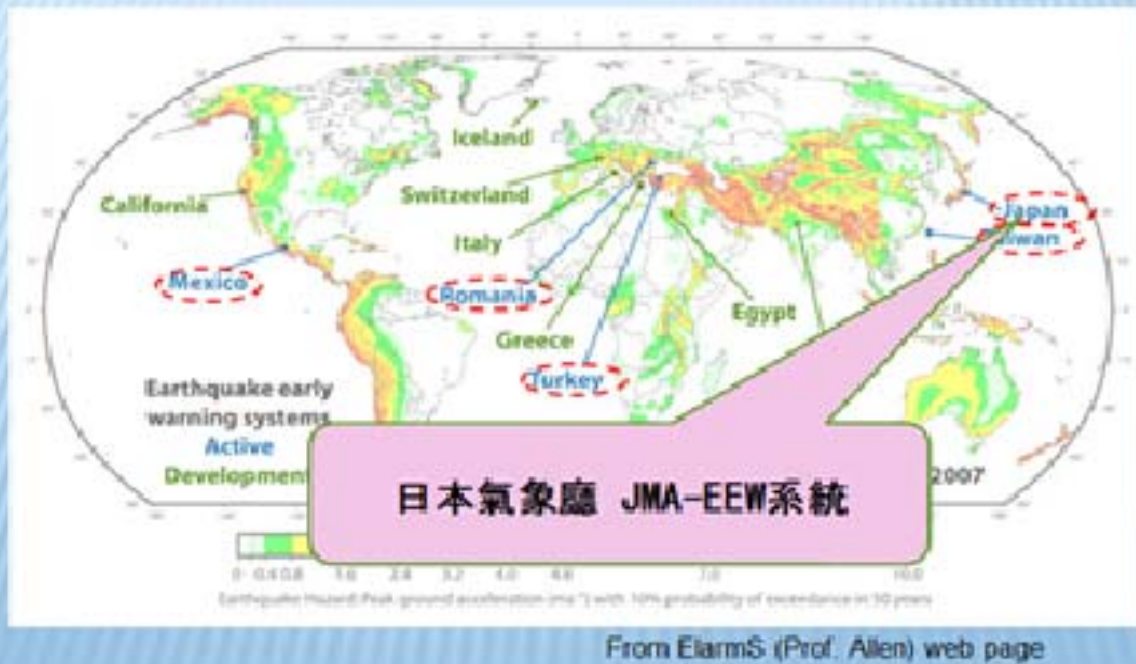


圖 2 EEW 系統發展國家

現今地震預警系統發展之國家及名稱陳述如下。

1. 墨西哥
地震預警系統：Sistema de Alerta Sísmica de la ciudad de México (SAS)。
2. 羅馬尼亞
地震預警系統：Early Warning System (EWS)。
3. 土耳其
地震預警系統：Istanbul Earthquake Rapid Response and Early Warning System (IERREWS)。
4. 伊朗
地震預警系統：Early Earthquake Detection and Warning Alarm System。
5. 美國
地震預警系統：California Integrated Seismic Network (CISN)。
6. 日本
地震預警系統：Earthquake Early Warning System (EEW)。
7. 中華民國
地震預警系統：Virtual Subnetwork (VSN)，尚未實施。

（三）日本 EEW 地震預警系統

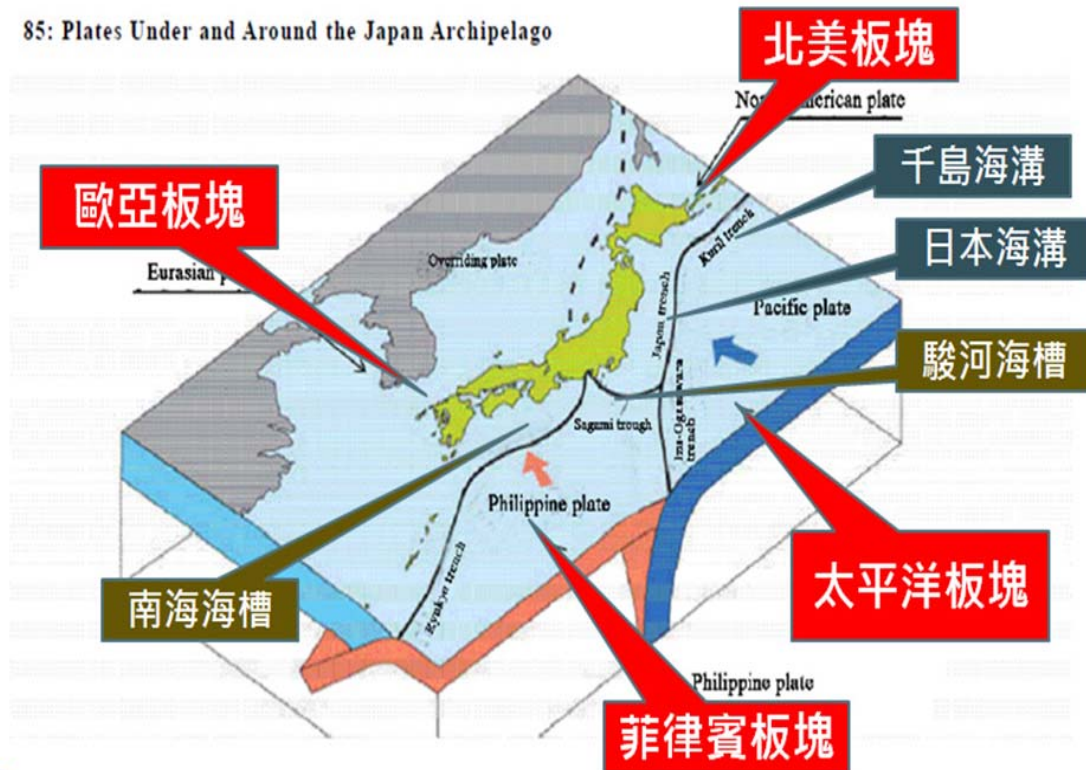
1. 日本群島周邊地殼板塊

談到日本發展之 EEW 地震預警系統，首先須瞭解日本群島周邊地殼板塊之地質環境。日本群島地處「歐亞大陸板塊」、「北美洲板塊」、「太平洋板塊」及「菲律賓板塊」四個板塊之交界處（圖 3）。太平洋板塊、北美洲板塊和歐亞大陸板塊、菲律賓板塊相互碰撞，使日本列島逐漸從海中突起。就地質學來看，日本列島十分年輕，中央構造線和糸魚川靜岡構造線是橫貫及縱貫日本之兩大斷層。糸魚川靜岡構造線以東一帶是日本最大的地塹中央地塹帶。在地質學上，中央地塹帶的西側是西南日本，東側是東北日本。中央地塹帶西側附近之地層表面覆蓋有歷史較短的火山噴出物，其下方則是誕生於中生代及古生代的地層，距今約有 5 億 5,000 萬年至 6,500 萬年歷史，而中央地塹帶一帶之妙高連峰則誕生自 2,500 萬年前，多為堆積物及火山噴出物構成，顯示在中央地塹帶曾發生過巨大之地殼變化。西南日本以中央構造線為界，分為內帶和外帶。中央構造線北側是高溫型的領家變成帶，地質以片麻岩和花崗岩為主，而南側是高壓型的三波川變成帶，以結晶片岩為主。兩條構造線迄今都仍在活動，也是日本國內火山和地震密集之地區。

日本地處四個板塊之交界處，地震和火山活動十分活躍，世界上每年發生的大小地震中，有約 10% 都是在日本附近發生。1996 年到 2005 年期間，世界上發生芮氏 6 級以上的震中，有 20% 都是發生在日本。20 世紀以來，在日本發生並造成重大損失之大地震有 1923 年的關東大地震（這場地震導致超過 10 萬人死亡，是日本史上死者最多地震。地震給日本首都東京帶來毀滅性打擊）、1995 年的阪神淡路大地震（此次地震之後，對於都市的地震對策、建築基準法的修訂及防災意識產生了重大影響）和 2011 年的東北大地震（地震所帶來的海嘯給東日本太平洋沿岸地區帶來重大災害，其引發核電站事故帶來的嚴重影響至今仍未消除）。而在沿海地區，地震之後引發的海嘯常帶來遠超過地震的影響，英語中之海嘯（Tsunami）一詞就是來自於日語。1896 年發生的明治三陸大地震引發的海嘯最高達 38 米，超過 22,000 人遇難或失蹤。2011 年發生的東北大地震引發的海嘯最高浪高達 40.5 公尺，約 2 萬人遇難或失蹤。〔2〕

日本群島周邊地殼板塊

85: Plates Under and Around the Japan Archipelago



Source: "Seismic Activity in Japan - Regional Characteristics Analyzed from Past Earthquakes 2nd Edition", edited by The Earthquake Research Committee, the Headquarters for Earthquake Research Promotion

3

圖 3 日本群島周邊地殼板塊

2. 日本 EEW 地震預警系統

1995 年 1 月 17 日，日本發生芮氏 7.2 級強烈大地震，稱為「阪神大地震」(Great Hanshin-Awaji Earthquake)，造成了前所未有的破壞，死亡人數超過 5000 人，近 35000 人受傷。超過 10 萬個建築物受到地震後之大火中毀於一旦，經濟損失高達約 9 兆 6 千億日元（表 1），為日本 GDP 當時之 2.5%。也因為阪神大地震之慘痛傷害，日本全面更新地震觀測網路（seismic observation network），並陸續進階至“KiK-net”及“Research Project for the Practical Use of Real-time Earthquake Information Networks”。

〔3〕

表 1 阪神大地震日本直接經濟損失分類統計

項 別	類 別	經濟損失（億日元）
1	建築物（住宅、店鋪、辦公樓等）	63,000
2	港灣設施	10,040
3	交通（高速公路、鐵路）	11,960
4	公共土木設施	2,926
5	文教設施	2,603
6	電 氣	2,300
7	上、下水	521
8	通 信	309
9	其 他	2,341
10	合 計	約 96,000

目前日本氣象廳（Japan Meteorological Agency, JMA）所建構之地震預警系統（Earthquake Early Warning System, EEW），已經在 2007 年 10 月正式上線，推廣到全日本境內。藉由 EEW 之預警，可以使高速行駛之火車提早減速，避免出軌意外之發生；或是讓運轉中的電梯及早停在接近的樓層，避免人員受困。雖然只是短短幾秒鐘之時間，卻顯得異常珍貴。目前日本民眾已經可以利用簡單的電子設備或手機，接收到即時之地震預警訊息。

EEW 之所以能夠發出預警，主要必須歸功於日本境內密集分佈之地震測站（大約每 20 公里一座），以及電腦能夠迅速計算出地震發生地點與震波傳播方向之成就。「地震預警系統原理」乙節，已述及最早自震源所傳出的 P 波，會以每秒大約 7 公里之速度前進；同時間傳出的 S 波，則是以每秒大約 3.5 公里的速度前進。S 波前進之速度雖慢，其震幅卻往往是 P 波之 3 至 10 倍，危害甚鉅。因此 EEW 便是根據較早到達的 P 波計算地震參數，然後針對 S 波的到達提出預警，以避免較大災禍發生。

JMA 收集超過 1000 個地震測站（stations, 如圖 4）之地震波形（wave form）紀錄，且系統在最短之時間比對測站所收到 P 波波形，推測地震發生之位置，進而計算震幅較大之 S 波會在何時抵達各處，以達到預警效果。若是後續其他測站之計算結果異於最初之估計，達到水平方向誤差在 0.2 度，垂直方向誤差在 20 公里，地震強度比原先估計的大 0.5 級或小一級時，EEW 會更新先前所發出的預警。甚至有可能當第一個測站收到

震波訊號，讓 EEW 發出預警之後（圖 5），卻沒有後續其他測站收到震波訊號，表示資料可能有誤，此時 EEW 也會取消預警。〔4〕

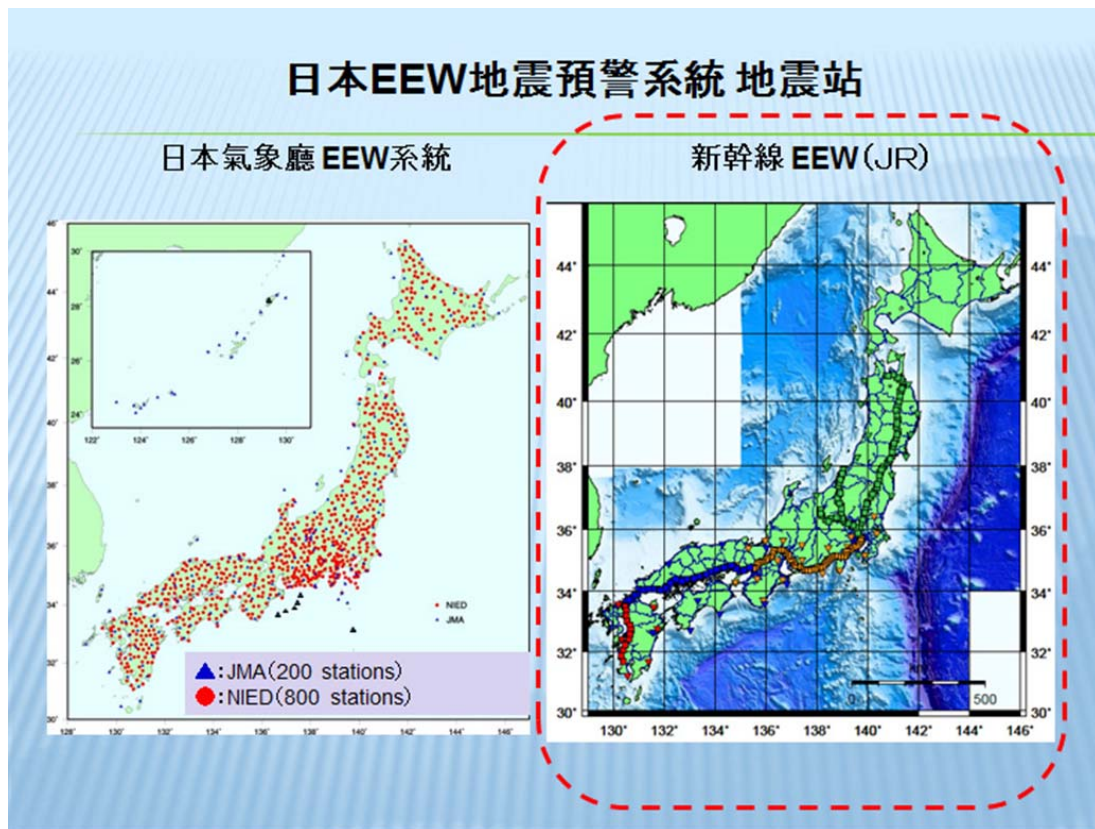


圖 4 日本 EEW 地震預警系統地震站

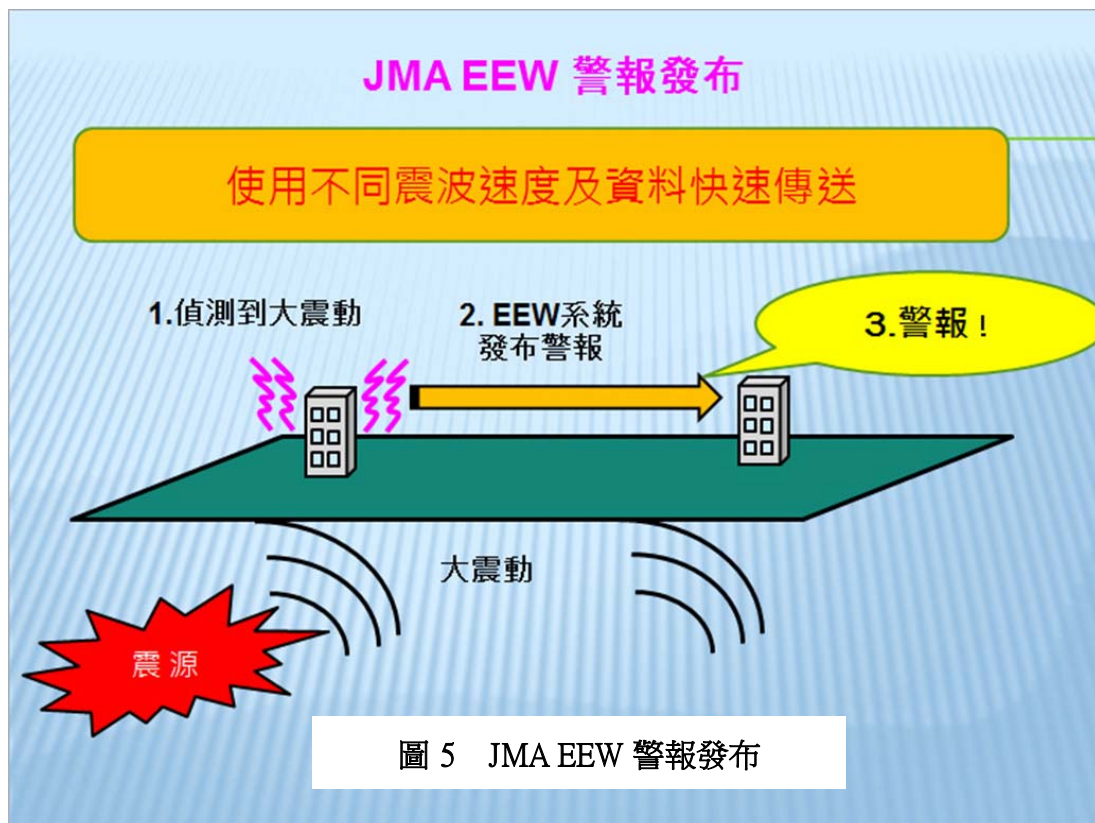


圖 5 JMA EEW 警報發布

JMA 自 2004 年 2 月起，持續測試這套系統長達 29 個月，至 2006 年 6 月為止之測試期間，EEW 共發佈了 855 次預警，其中只有 26 次假警報。這些假警報形成之原因多為機件故障或閃電所致，且均來自單一測站之資料。

當然日本 EEW 地震預警系統，亦非毫無瑕疵，仍有面臨之問題及挑戰，將另於後述章節說明。不論如何，EEW 傳遞之地震資訊日本民眾已能垂手可得，可謂相當進步了。

3. 日本氣象廳地震震度分級（JMA Seismic Intensity Scale）

日本氣象廳地震震度（JMA Seismic Intensity Scale）最高級為 7 級，其中 5 級及 6 級，又下分 2 級（Lower 及 Upper），總計 10 分級（如圖 6）。

- （1） 0 級。
- （2） 1 級。
- （3） 2 級。
- （4） 3 級。
- （5） 4 級。
- （6） 5 級小（5 Lower）。
- （7） 5 級大（5 Upper）。
- （8） 6 級下（6 Lower）。
- （9） 6 級大（6 Upper）。
- （10） 7 級。



圖 6 日本地震震度分級

Earthquake Early Warning : Dos & Don'ts

Make residences earthquake-resistant and fix furniture to prepare for earthquakes

Call the attention of those around you

If you feel a tremor

Remain calm, and secure
your personal safety!

If you see/hear
an EEW

After seeing or hearing an Earthquake Early Warning, you have only a matter of seconds before strong tremors arrive. This means you need to act quickly to protect yourself.

At Home

- Protect your head and shelter under a table
- Don't rush outside
- Don't worry about turning off the gas in the kitchen



When Driving

- Don't slow down suddenly
- Turn on your hazard lights to alert other drivers, then slow down smoothly
- If you are still moving when you feel the earthquake, pull safely over to the left and stop



In Public Buildings

- Follow the attendant's instructions
- Don't rush to the exit



Outdoors

- Look out for collapsing concrete-block walls
- Be careful of falling signs and broken glass



On Buses or Trains

- Hold on tight to a strap or a handrail



In Elevators

- Stop the elevator at the nearest floor and get off immediately



圖 7 地震時安全建議

4. 預報及警報 (forecast and warning)

當地震發生，鄰近震源之地震測站會根據所收到的 P 波訊號，首先判斷地震強度。如果達到日本氣象廳地震震度 3 級 (3L) 時，EEW 將對企業使用者 (advanced users) 傳出預報 (forecast)；一旦地震強度在 5 級略小或以上 (5L or larger) 震度時，便對一般民眾 (general public) 經由電視、收音機、媒體、網際網路、手機等發布警報 (warning)，如圖 8，以提前採取防災及避難措施。

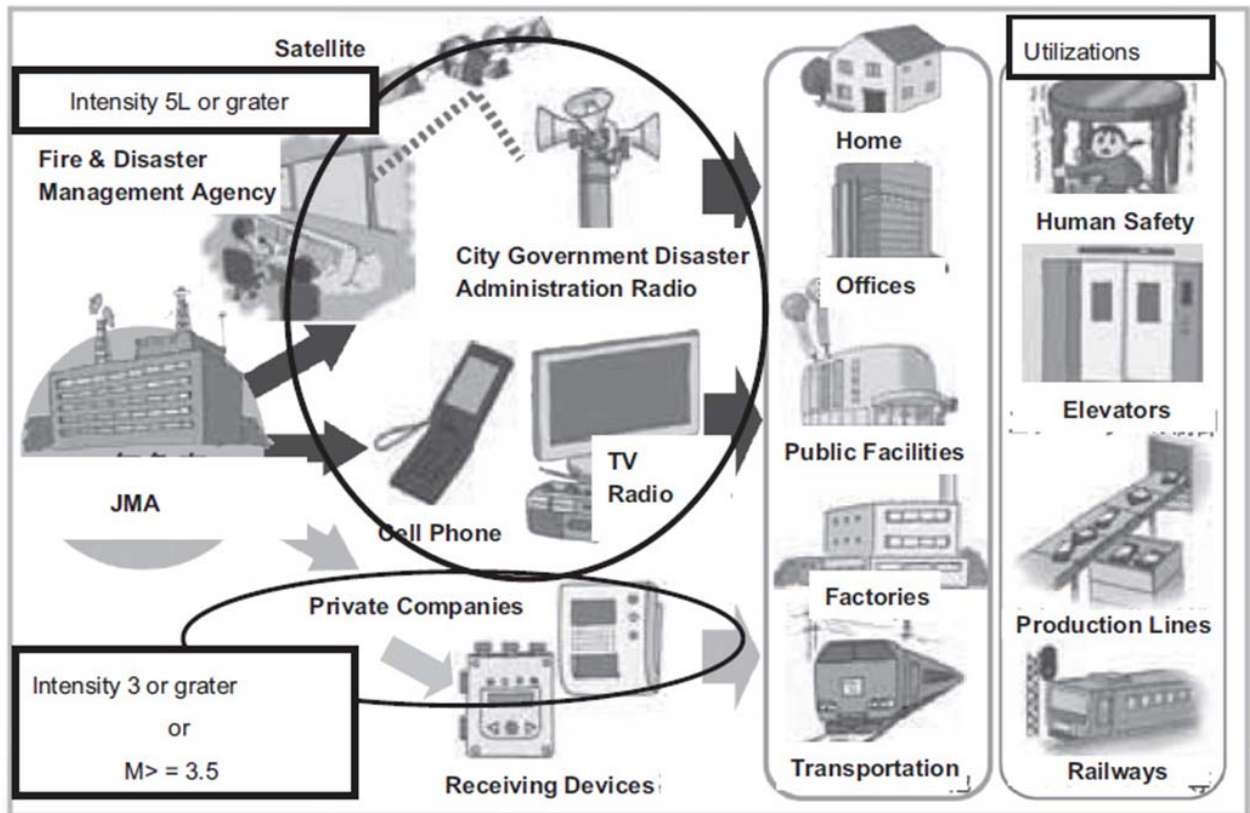


圖 8 預報及警報

5. 預測地震強度之準確度 (Accuracy of seismic intensity prediction)

JMA 評估預測地區 (forecast regions) 自 2004 年 1 月至 2009 年底間之 486 件預測地震案例 (涵蓋初期測試階段案例)，得其觀察震度值 (Observed seismic intensity) 及預期震度值 (Expected seismic intensity) 如附比較表 (如表 2)。

綜觀 486 件案例，有 109 件案例，觀察震度值與預期震度值相符 (占 22%)，不相同者 (占 78%)。其中差異達 $\pm 1\%$ ，計有 76%， $\pm 2\%$ 則有 24% (如表 3)。從上述數據顯示，JMA 預測地震強度之準確度，仍有提升之實質空間。

Table2

Comparison between observed and expected seismic intensity. Observed and estimated seismic intensity in warning areas were compared for the cases where observed and/or estimated seismic intensity was 5L and greater during 25 February 2004–31 December 2009. A figure in a cell shows frequency of cases. The bold values show an expected seismic intensity coincides with an observed one. The italic values show one rank difference between expected and observed.

Observed seismic intensity	Expected seismic intensity							
	Below 2	3	4	5L	5U	6L	6U	7
Below 1			12					
2			15					
3			94	1	1			
4	38	<i>113</i>	95	17	3			
5L	1	19	27	11	2			
5U		3	12	6	2			
6L			4	2	1	1		
6U			2		2	<i>1</i>		
7				1				

表 2 預測地震強度資料統計 (1)

Table 3

Summary of comparison between observed and expected seismic intensity was 4 or greater. 76% estimations are within ± 1 rank of Seismic Intensity Scale.

Difference in Seismic Intensity Scale	Frequency	Ratio (%)
0	109	22
± 1	261	54
± 2	116	24
Total	486	100

表 3 預測地震強度資料統計 (2)

6. 面臨之問題及挑戰

- (1) 現今日本 EEW 地震預警系統，當然也不是萬能的，如果地震震源是發生在陸地接近地面的地方，由於 S 波很快就會抵達鄰近區域，造成緊急預警系統有來不及發佈警報（warning）之問題。
- (2) 若是遭遇芮氏規模 7 級以上之大型地震，因為斷層破裂的時間較長，EEW 之第一份報告（first report）常有低估（under evaluated）地震強度之情形。此問題，亦為日本 EEW 地震預警系統需面臨之挑戰。
- (3) 大型地震破裂面積之確認（identification）尚未精確，仍是另一個重要挑戰。
- (4) 當兩個地震連續發生在同一地點時，EEW 無法精確地區隔出兩個先後發生之地震。
- (5) 由於日本、墨西哥與臺灣均位處於「俯衝帶」（Subduction zone），日本 EEW 地震預警系統，期望更有效地預測出「俯衝帶」區域內發生之地震強度等資訊。特別是 1944 年曾發生 8.1 級強烈地震之東南海（Tonankai）及南海（Nankai）地區。

何謂「俯衝帶」？

大洋板塊移動並與大陸板塊相遇時，由於大洋板塊岩石密度較大，地位也低，便俯衝到大陸板塊之下，這一俯衝部分叫做「俯衝帶」，亦稱隱沒帶、潛沒帶、消滅帶等。俯衝帶兩側板塊會聚邊界稱會聚邊緣（convergent boundary），俯衝帶上面反映震源活動的地帶稱「貝尼奧夫（地震）帶」（Benioff seismic zone）。

因應預測「俯衝帶」區域地震強度等資訊，日本正因應研發特殊之日本 EEW 地震預警系統，並有配合增設海底地震儀（Ocean Bottom Seismometer，OBS）之計畫。



照片 7 海底地震儀（OBS）



照片 8 海底地震儀諸元

（四）日本 EEW 緊急警報系統之應用

1. 緊急警報系統（Emergent Alarm System）

東海地區（Tokai region）愛知縣、三重縣、岐阜縣及靜岡縣，位於日本中部區域，擁有豐田（Toyota）、本田（Honda）及鈴木（Suzuki）等大型知名汽車公司，以及所屬龐大之製造工廠。另一方面，在數百年前該地區就曾多次遭受到震幅（earthquake magnitude）7-8 級之強烈地震。而隨著 2011 年東北大地震發生之後，9 級以上強烈地震之來臨，更是令人害怕；追溯原因是強烈地震後引起之土壤液化（liquefaction）及海嘯（tsunami）破壞，極為嚴重，不僅使日本該地區遭受毀滅性破壞，更足以衝擊全球之經濟。〔5〕

有鑑於此，愛知工業大學「防災研究中心」（DPREC, Disaster Prevention Research Center, Aichi Institute of Technology）聯合東海地區企業界，研究提升企業災害管理能力。DPREC 主要研究目標將日本氣象廳（JMA, Japan Meteorological Agency）建構之地震預警系統（Earthquake Early Warning, EEW）訊息，透過網際網路（internet system）傳輸至東海地區設置於各企業使用者（advanced user）內工廠、辦公室之伺服器（server），以迅即瞭解地震資訊及採取因應措施。伺服器之監視器（monitor）將呈現地震強度（intensity）、到達時間（arriving time）、P 波 S 波自震央之行徑動態，並於強烈地震來臨前發出警報（warning；alarm），此系統即為 EEW 緊急警報系統（Emergent Alarm System）。可有助於強烈地震到達前，員工疏散（workers-evacuation）、停機、生產線暫停等作業之進行。

緊急警報系統（Emergent Alarm System）由 DPREC 負責發展，成功設置於日本約 100 家企業，不僅東海地區，目前已延伸至其他區域。該系統主要有網路系統（Network system）、傳輸系統（Delivery System）、終端設施（Terminal Devices）等三部分，茲分述如後：

（1）聯網系統（Network system）

圖 9 顯示由 DPREC 設置於東海地區之聯網系統（Network system），黃色圓點表示 EER 接收終端系統及 E-catcher 型式地震儀位置；藍色圓點則是 ETNA 及 AIR 型式地震儀所表示之地震觀察點位置。

a. E-catcher 型式地震儀

可經由網際網路及時（on time）將觀察資傳輸至伺服器，包含地震強度（seismic intensity）、最大加速度（maximum acceleration）等。然而，粗估僅有 1gal（重力加速度單位）之靈敏度（sensitivity）。

b. ETNA 型式地震儀

可得到高靈敏度及高品質觀察資料，可是沒有及時系統功能。觀察資料經由 PHS 系統數小時後輸入 DPREC 伺服器。

c. AIR 型式地震儀

擁有及時功能並可得到高靈敏度資料，只設置於 5 個地點。

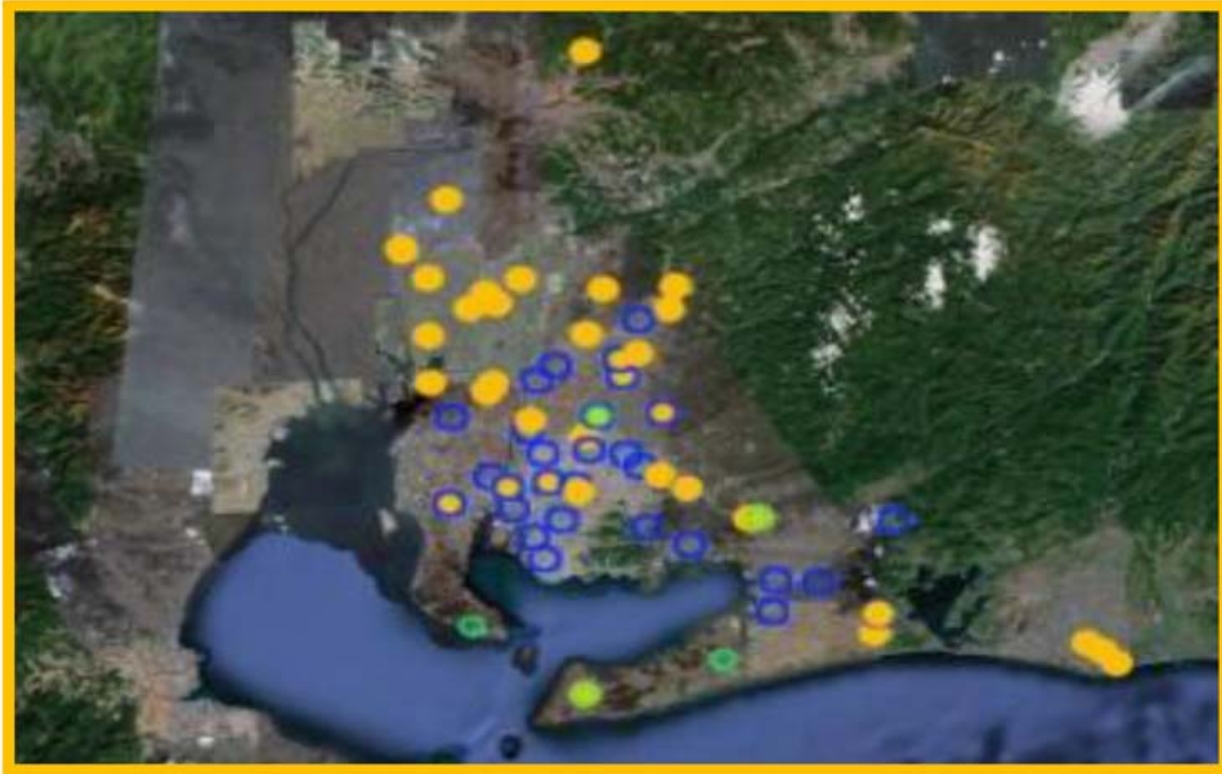


圖 9 聯網系統

EER 接收終端設備 (terminals) 包含個人電腦伺服器 (PC server)、監視器 (monitor)、數據機 (modem)、緊急電力供應 (Emergency Power Supply, EPS) 等，已設置於日本約 100 家企業內，前述 3 種地震儀東海地區有 60 地點 (含與 EER 接收終端設備相同位置)。

全部地震資料及 EER 資訊儲存於 DPREC 伺服器內，由 DPREC 負責管理，EER 接收終端設備亦由其管理，我們稱此系統為愛知系統 (Ai-system)。使用此網路系統，EER 及地震強度等資訊都可於地震到達前及時傳送使用者。



圖 10 DPREC 辦公室接收及傳輸 EEW 訊息伺服器

(2) EEW 傳輸系統 (Delivery System)

圖 11，顯示由 DPREC 管理之傳輸系統。日本氣象廳 (Japan Meteorological Agency, JMA) 有提供日本氣象業務中心 (Japan Meteorological Business Support Center, JMBSC) EEW 之租用線 (leased line)。DPREC 係由日本氣象業務中心透過 IP/VPN 線接收 EER 訊息，並於 24 小時經網路線 (ADSL, ISDN or optical fiber line) 傳輸至各企業辦公室、工廠及其他公司內之設備。

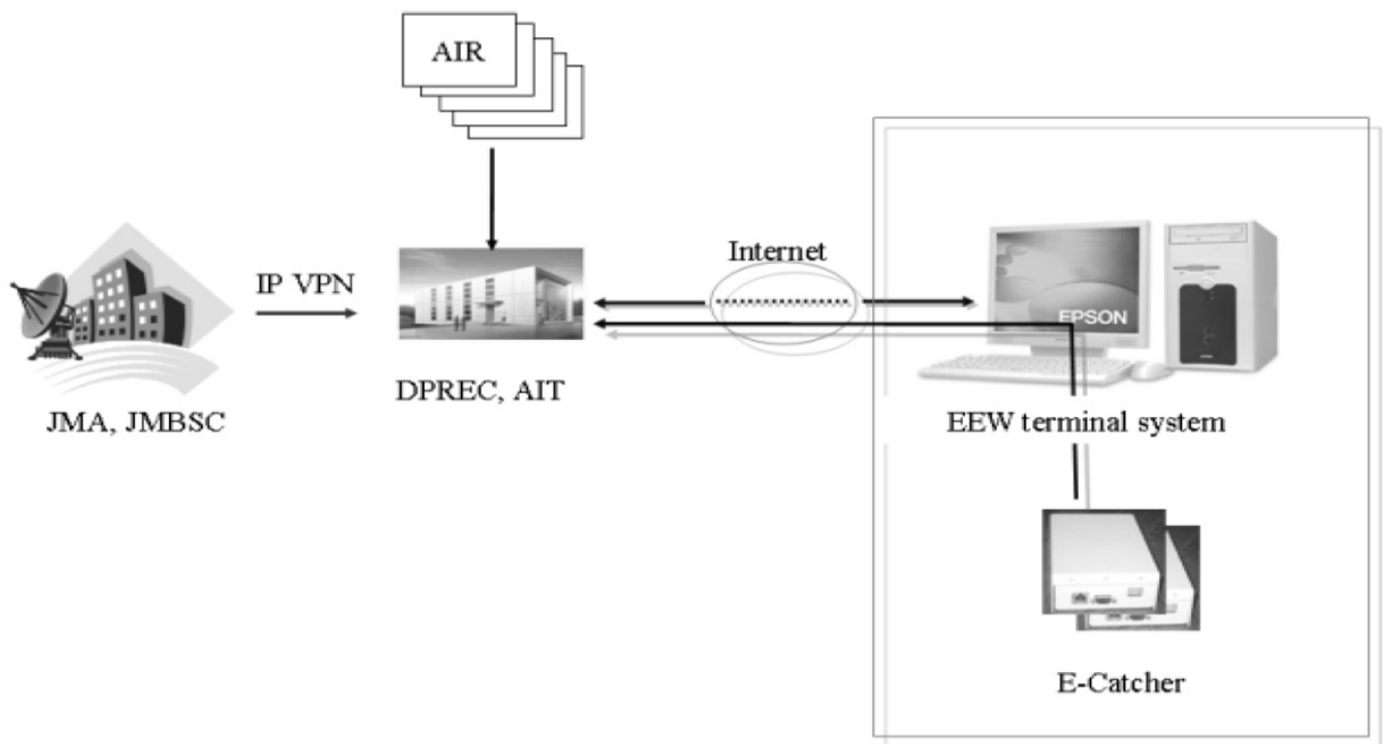


圖 11 緊急警報傳輸流程

(3) EEW 終端設施 (Terminal Devices)

圖 10，顯示設置於 DPREC 辦公室接收及傳輸 EEW 訊息之伺服器。照片 9（左），為一終端系統包含路由器(router)、個人電腦（PC）主機、監視器（monitor）、警報設備（alarm device- FTE）、一對 E-catcher 型式地震儀及不中斷電源供給裝置。照片 9（中），FTE 警報系統有警聲（alarm sound）、閃光（light flash）功能及顯示預估 S 波地震強度與地震到達時間。照片 9（右），個人電腦監視器螢幕顯示 P 波 S 波傳播速度、預估地震強度及強震到達時間等資訊。



照片 9 (左)終端系統包含路由器(router)、PC 主機、monitor、alarm device-FTE 、

1 對 E-catcher 型式地震儀及不中斷電源供給裝置；

(中)FTE 警報系統有警聲(alarm sound)、閃光(light flash)功能及顯示預估 S 波地震強度與地震到達時間；

(右)個人電腦監視器螢幕顯示 P 波 S 波傳播速度、預估地震強度及強震 到達時間等資訊。

2.緊急警報系統之實際使用

(1) 使用者 (Users)

DPREC 已傳送 EEW 訊息至日本 100 家使用者，涵蓋大小公司，行業別如辦公室、公司之汽車工廠、製造機器、化學物質等，也包括大學、學校及醫藥廠等。

(2) 系統案例 (Example of system)

圖 12，顯示 EEW 緊急警報系統建置於企業之實際情形，涵蓋工廠、辦公室及其他設施地點。透過網際網路線，EEW 訊息從 DPREC 伺服器 (server) 輸入企業總部 (headquarter) 之終端伺服器。終端伺服器送至工廠、辦公室及其他設施地點。緊急警報設施並啟動發送警報 (inform alarm)。

(3) 警報設施案例 (Examples of alarm devices)

圖 13，顯示強烈地震來臨，可使用許多警報方法 (alarm methods) 從危險情況挽救員工及設施，諸如：

- a. 臨近樓層停止電梯。
- b. 廣播開始疏散 (evacuation)。
- c. 停止機組及系統。
- d. 使用閃燈 (flash lights) 及密集聲響 (intense sounds)。
- e. 使用特殊之振動錶。

對於通知危險區域而言，廣播聲音及警告聲明 (warning statement) 之確實及可靠，絕對是極為重要。工廠內若有巨大聲響及強光之情形，則必需因應其他方式。

(4) 實際使用案例 (Examples of practical use)

在日本，EEW 緊急警報系統之使用已有許多案例：諸如工廠、車站、學校、醫院、工地、商店中心等。

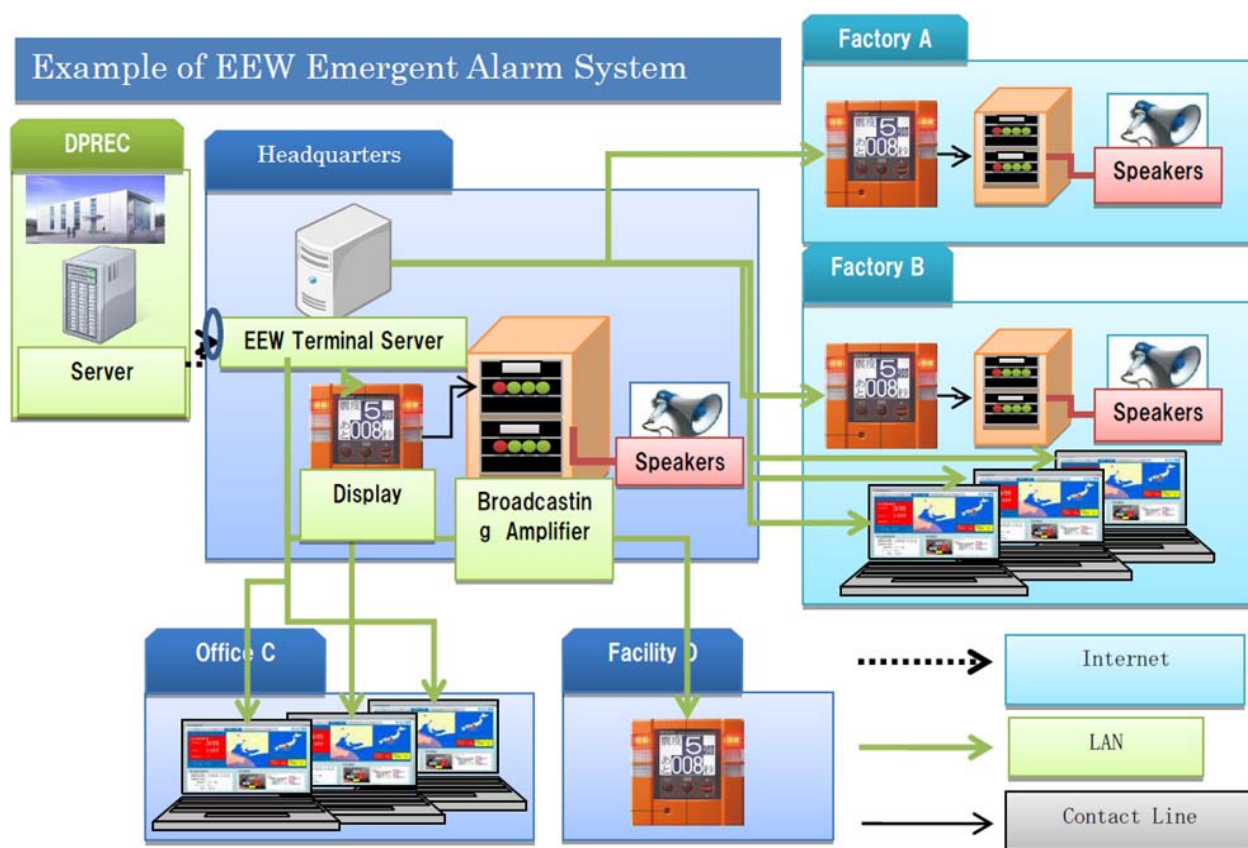


圖 12 企業建置案例

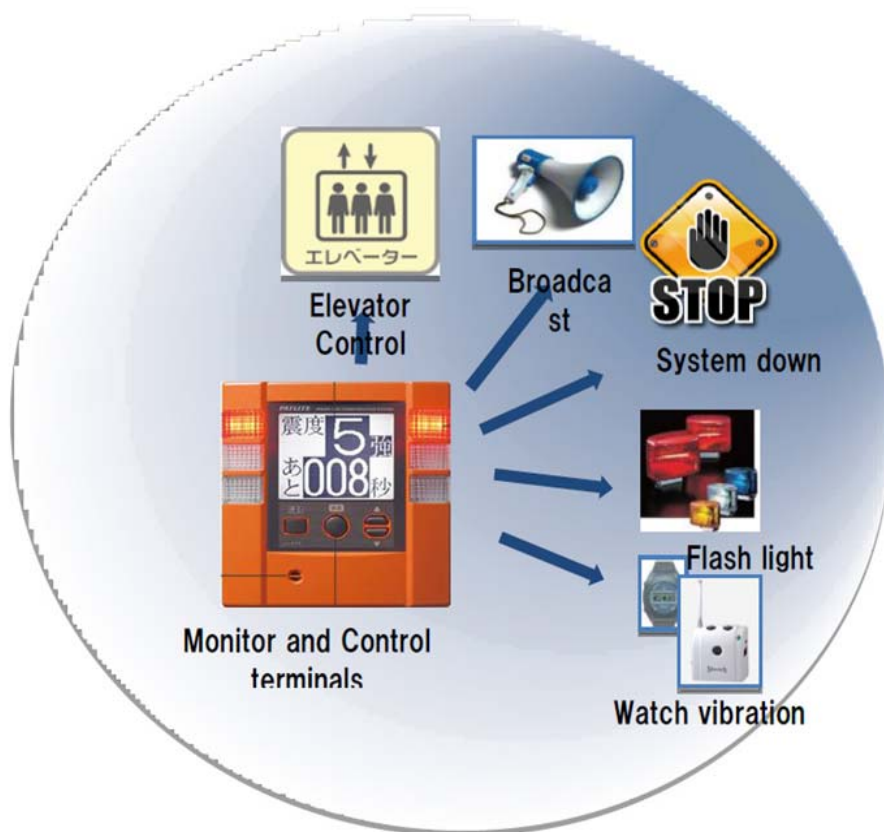


圖 13 警報設施案例

照片 10（左）顯示日本愛知工業大學（Aichi Institute of Technology）使用 EEW 緊急警報系統進行防災演習之實況。學校學生、教授及所有人聽到蜂鳴器（buzzer）緊急廣播（emergent broadcast）後，即迅速由教室及實驗室疏散至足球場。

照片 10（中、右）顯示化學工廠使用 EEW 緊急警報系統，關閉毒性物質儲槽節流筏系統（valves）之情形。在一些半導體工廠（semiconductor factories），亦採用相同警報系統，進行停止危險氣體及物資之輸送。



Photo 4.1. Evacuation training by using EEW emergent alarm system at author's university.

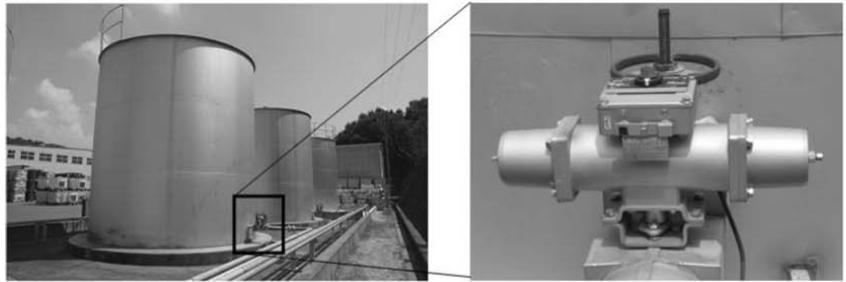


Photo 4.2. Example of shutdown system to close valves attached to a tank of toxic materials by EEW emergent system developed by DPREC.

照片 10 （左）愛知工業大學防災演習實況；（中、右）化學工廠使用 EEW 緊急警報系統，關閉毒性物質儲槽節流筏系統(valves)之情形。

（五）日本新幹線使用 EEW 之概況

1. 新幹線地震預警系統歷代演進

1964 年 6 月，發生之芮氏規模 7.5 級「新潟地震」為日本新幹線使用 EEW 之動機。實際上，日本新潟就是一個地震多發之地區，其中比較嚴重的地震包括：

- 1933 年，新潟地區發生芮氏 6.1 級地震。
- 1964 年，發生芮氏 7.5 級新潟地震。
- 2004 年，發生芮氏 6.8 級地震。
- 2007 年，發生芮氏 6.8 級地震。

日本地震專家阿部勝徵認為，新潟縣之所以地震頻繁，是由於東西板塊的壓力導致出現地殼「變形集中帶」，在釋放積蓄能量的過程中反覆出現了地震。新幹線地震預警系統，也因為「新潟地震」開啟研發之路，除現行之 JMA-EEW 外，依時間之演進可概分為四代。〔6〕

(1) 第一代（S 波，沿線檢知系統）

依前述說明已知，地震預警系統原理係藉由 P 波及 S 波之波速差異特性，達成提前預警之作用。然而，第一代及第二代地震預警技術尚未成熟，因此使用 S 波方式進行預警。

簡言之，新幹線沿線地震偵測器（seismograph；seismometer）偵測到來自地震震央（epicenter）之 S 波，其震幅達臨界值（threshold）40gal 以上時，即發出預警，此為第一代地震預警系統（On the site S-wave detection system）（如圖 14）。1965 年 12 月，在東海道新幹線所有變電站設置檢知裝置，當偵測到 40gal 以上之地震時，即斷電停止列車運轉。

新幹線沿線地震偵測器，設置間距為 20 公里 1 處。地震偵測器有機械式（mechanical）及電子式（electric）二種型式。〔7〕

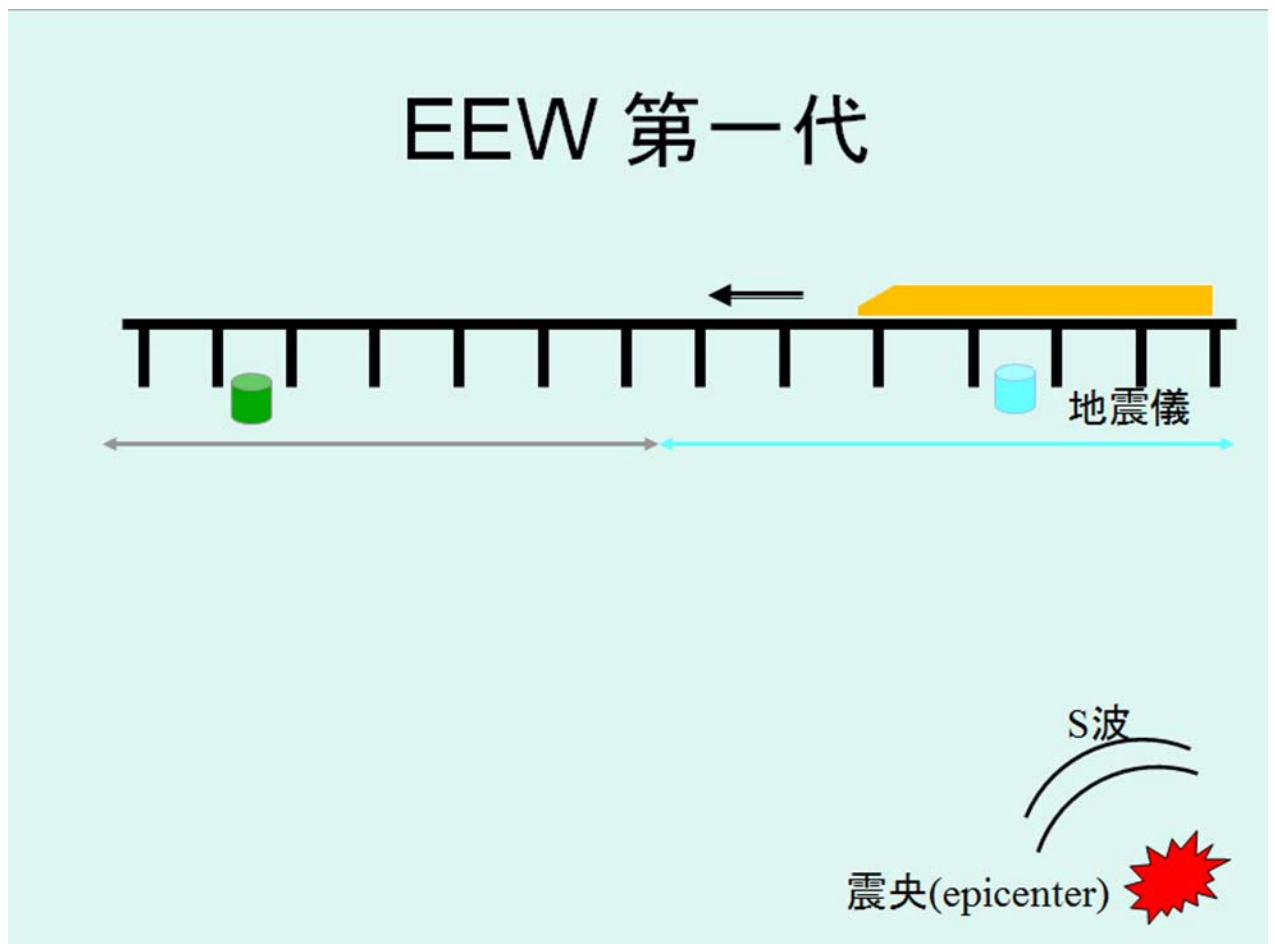


圖 14 第一代（S 波，沿線檢知系統）

(2) 第二代 (S 波，海岸線檢知系統)

日本地震頻繁，尤其來自海岸線地區為數甚多，因此有加設 S 波海岸線 (coastline) 檢知系統之構想及需求，期提早偵測到地震資訊，及爭取更多預警之因應時間，此謂新幹線第二代地震預警系統 (Coastline S-wave detection system) (如圖 15)。

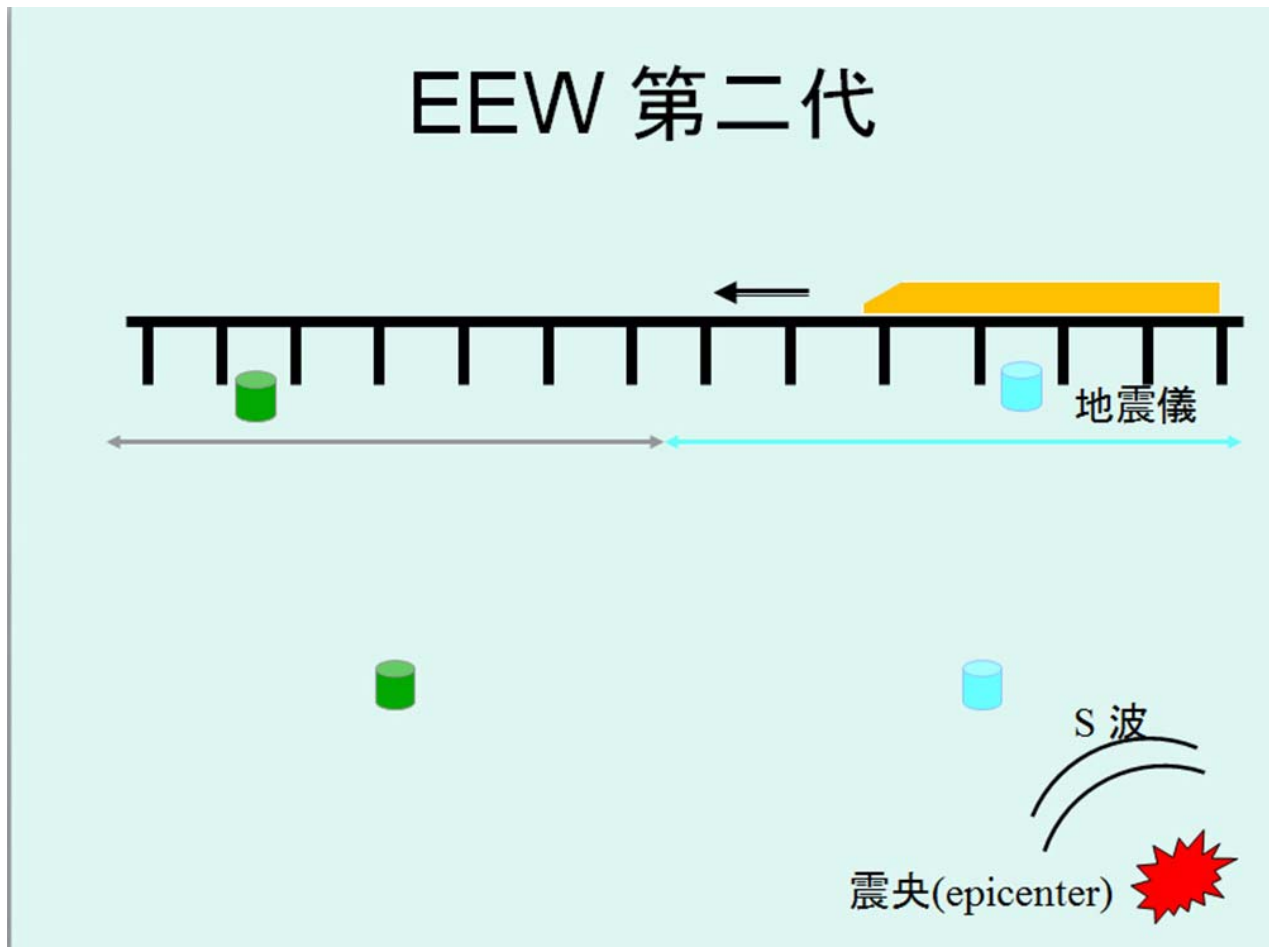


圖 15 第二代 (S 波，海岸線檢知系統)

(3) 第三代【P 波→S 波，沿線及海岸線（個別地震偵測器）檢知系統】

約自 1992 年起，新幹線正式依地震預警系統原理「P 波→S 波之波速差異特性」，來達成提前預警之作用，第三代使用範圍涵蓋新幹線沿線及海岸線。此時雙線之各地震偵測器，仍僅具有個別偵測功能及所屬範圍（如圖 16）。

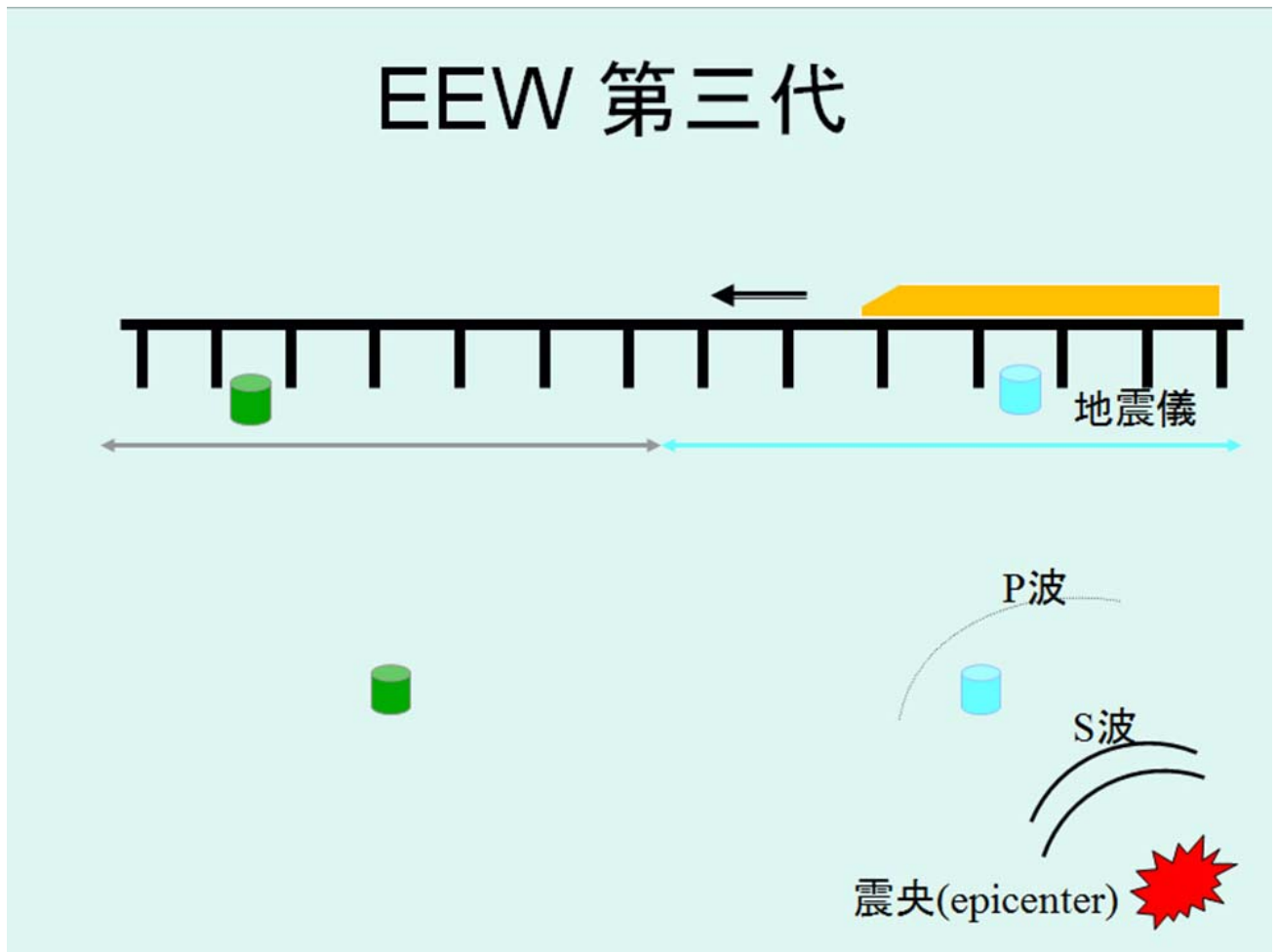


圖 16 第三代【P 波→S 波，沿線及海岸線（個別地震偵測器）檢知系統】

新幹線進階至第三代地震預警系統，就必須提及分析系統：「緊急地震檢知警報系統」（Urgent Earthquake Detection and Alarm System, UrEDAS）及簡便型「緊急地震檢知警報系統」（Compact Urgent Earthquake Detection and Alarm System, Compact UrEDA）。

a. 「緊急地震檢知警報系統」(Urgent Eartyquake Detection and Alarm System, UrEDAS)

UrEDAS 系統由新幹線沿線地震偵測器傳送之地震資料，成功即時停止子彈列車 (bullet train) 之行駛，成為全世界第一個實現 EEW 地震預警概念之系統。

UrEDAS 系統自 1980 年研發，經過測試階段後，於 1992 年正式使用，主要功能為評估地震震幅 (magnitude)、位置 (location)、致災度 (vulnerability) 及數秒內使用來自單一地震偵測器 P 波資訊發布警報 (issuing warning)。不同於其他地震自動偵測系統，UrEDAS 系統不須傳輸遠端中央處理系統有關觀察震波之及時資料，因此操作上相對簡單。

該系統計算參數 (parameter) 如反方位角 (back azimuth)，主要震幅次數 (frequency) 及 P 波 S 波間之垂直水平比 (vertical-to-horizontal ratio)。UrEDAS 系統能夠發布警報係基於 M- Δ 圖 (M- Δ diagram) 之建構，M- Δ 圖所屬資料主要源於日本國鐵 (Japanese National Railways, JNR) 設施過去之破壞經驗及地震相關資訊。

UrEDAS 系統偵測到 P 波後，至發布警報之處理時間 (processing time)，計需 3 秒。

b. 簡便型「緊急地震檢知警報系統」(Compact Urgent Eartyquake Detection and Alarm System, Compact UrEDA)。

簡便型「緊急地震檢知警報系統」(Compact UrEDA)，其實就是 UrEDAS 系統之進階型，偵測到 P 波後，至發布警報之處理時間 (processing time)，可縮減至只需 1 秒。Compact UrEDA 系統，於 1998 年開始使用於東北、上越、長野新幹線。

Compact UrEDA 系統發布警報之處理時間，雖可縮減至只需 1 秒，警報區域卻僅涵蓋地震偵測器周圍 20 公里。UrEDA 系統，則是涵蓋地震偵測器周圍約 200 公里。

為使地震預警系統最有效，日本專家建議對於遠距離大地震之預警，可使用 UrEDA 系統處理；鄰近地震區之預警，可採用 Compact UrEDA 系統因應。

(4) 第四代【P 波→S 波，沿線及海岸線（地震偵測器聯網）檢知系統】

第四代及第三代均為使用 P 波→S 波速度之差異，來提前發布預警。最大差異在於第四代警報範圍擴及新幹線沿線及海岸線，非僅及個別區域，因為新幹線沿線及海岸線所屬區域均已聯線，此二線列車均可停止行駛（如圖 17）。

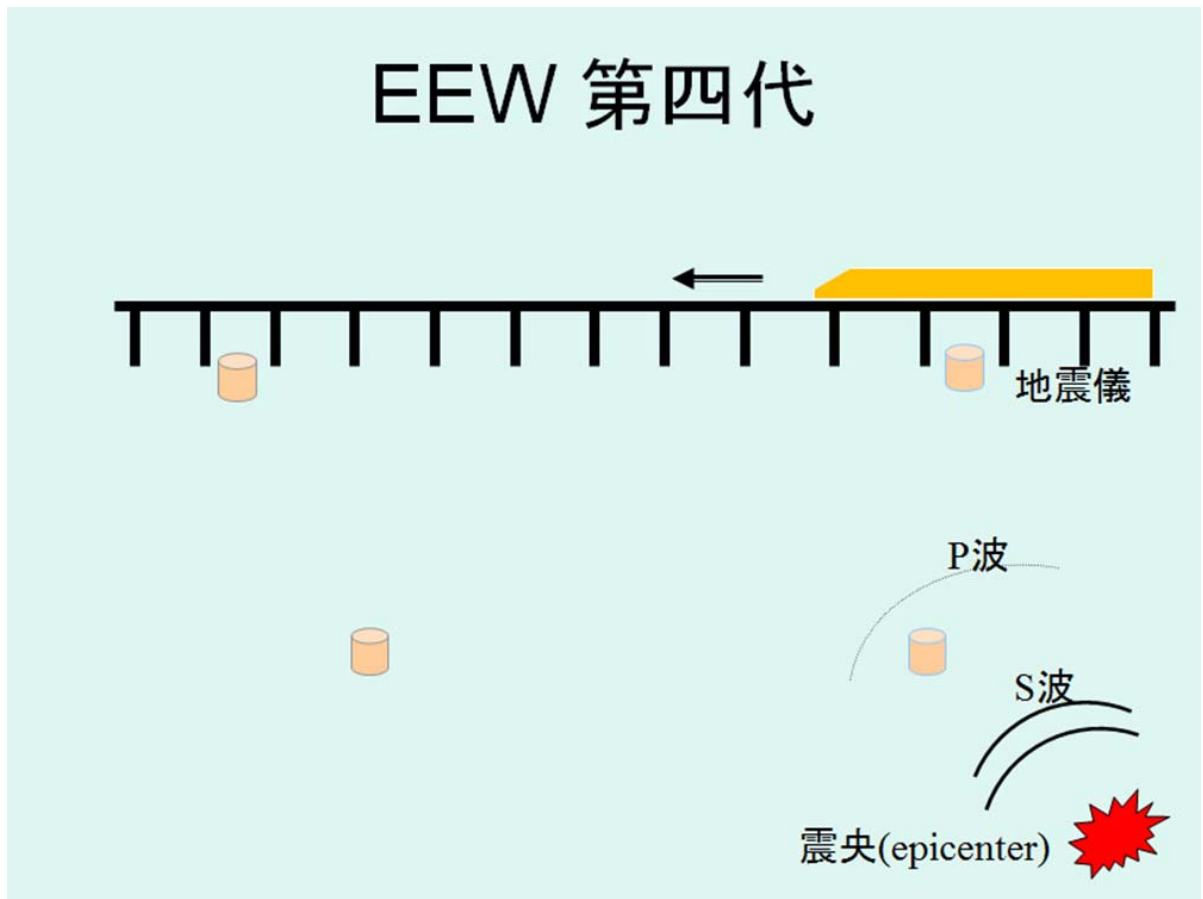


圖 17 第四代【P 波 →S 波，沿線及海岸線(全部地震偵測器聯線)檢知系統】

UrEDA 及 Compact UrEDA 系統之結合，又誕生新一代分析系統，不僅系統尺寸及重量減小，也提高了功能性（functionality），此項發展於 2005 年完成，稱為 FREQL（Fast Response Equipment against Quake Load）系統。就日語而言，FREQL 之發音“furekkuru”，意謂「海浪來了」。FREQL 系統將偵測到 P 波至發布警報之處理時間（processing time），從 1 秒再縮減至只需 0.2 秒。於 2009 年，更提升只需 0.1 秒。此項技術之突破，即使震源區域發生強震，FREQL 系統也可於地震前發布警報。

FREQL 系統不僅對於剛開始的地震非常有分析價值，也對主震（main shock）後之救援作業（rescue operations）及餘震（aftershock）

警報有積極所貢獻。例如日本 2004 年 10 月 23 日發生新潟縣中越地震（Niigata-ken-Chuetsu earthquake），東京消防局快速救援隊（Hyper Rescue Team），於山崩瓦礫下救出一位小孩後，曾聯繫使用 FREQL 系統，以確保餘震時救援人員之個人安全。

基於消防局的要求，具隨身影相之 FREQL 系統於 2005 年研發成功，此機型除進一步改善系統處理能力外，也使機身更輕便。FREQL 全機組包含主機（Main Body）、警報設備（Alert Unit）、顯示螢幕（Display Unit）及電池組（Battery Pack）等。隨身型 FREQL 現已使用於全世界許多國家之消防局（fire departments），甚至是應用於國際災難救援隊，使用案例如 2006 年巴基斯坦地震（Pakistan earthquake）及 2008 年四川大地震（Sichuan earthquake），見圖 18。而美國柏克萊（Berkeley）、帕莎蒂娜（Pasadena）及加州（California）等大學，也陸續都完成使用測試。



圖 18 隨身型 FREQL 使用於四川大地震

Tokyo Metro 是位於日本東京都會區之地下鐵網路公司，該公司建立之地震預警系統，其中有 6 個車站有 FREQL，另外 33 個車站則有 AcCO，足以面對地震作立即快速之反應。AcCO 是一種廣泛使用之隨身型地震偵測器，可即時顯示地震強度及水平加速度。在建置 FREQL 及 AcCO 網路後，Tokyo Metro 也裝置 JMA 之 EEW 地震預警接受器（receiver）。由於擁有 FREQL 及 AcCO 為基礎之精準快速地震預警資訊，幫助此公司將列車中斷行駛減至最小，即使 JMA 之 EEW 地震預警系統發錯警報或者是延後發布。

圖 19，顯示偵測 P 波後之發布警報之處理時間（Processing time），FREQL 系統很明確縮減至 0.2 秒，甚至是 0.1 秒。〔8〕

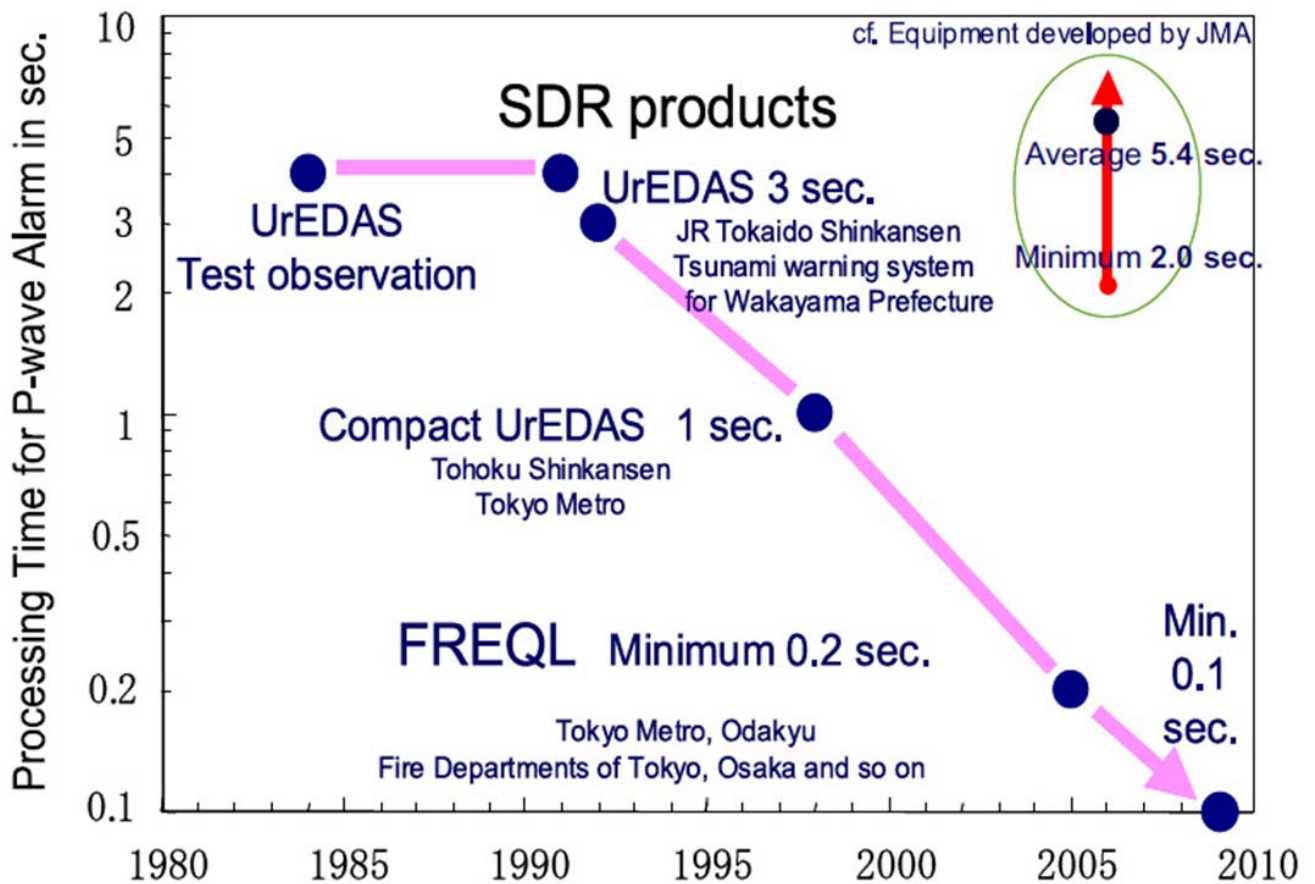


圖 19 偵測 P 波後發布警報處理時間演進史

(5) JMA- EEW (新世代)

在第四代之前，新幹線地震預警系統主要之地震測站為 JR 所建立，而前已陳述自 2007 年 10 月起，日本氣象廳（Japan Meteorological Agency, JMA）所建構之地震預警系統（Earthquake Early Warning System, EEW）已正式上線。目前，新幹線亦將日本氣象廳所提供之緊急地震速報資訊導入行車控制機制使用，此新世代地震預警系統，簡稱為 JMA- EEW（圖 20）。

JMA- EEW 有超過 1000 個地震測站，其中約 800 個來自於「國家地球科學及防災研究所（National Institute of Earth Science and Disaster Prevention, NIED）」；另外約 200 個地震測站，則為日本氣象廳（JMA）本身所擁有。

另外，就地震發生離震央 50 公里內之區域來說，FREQ 系統是較 JMA- EEW 更能快速發布警報。

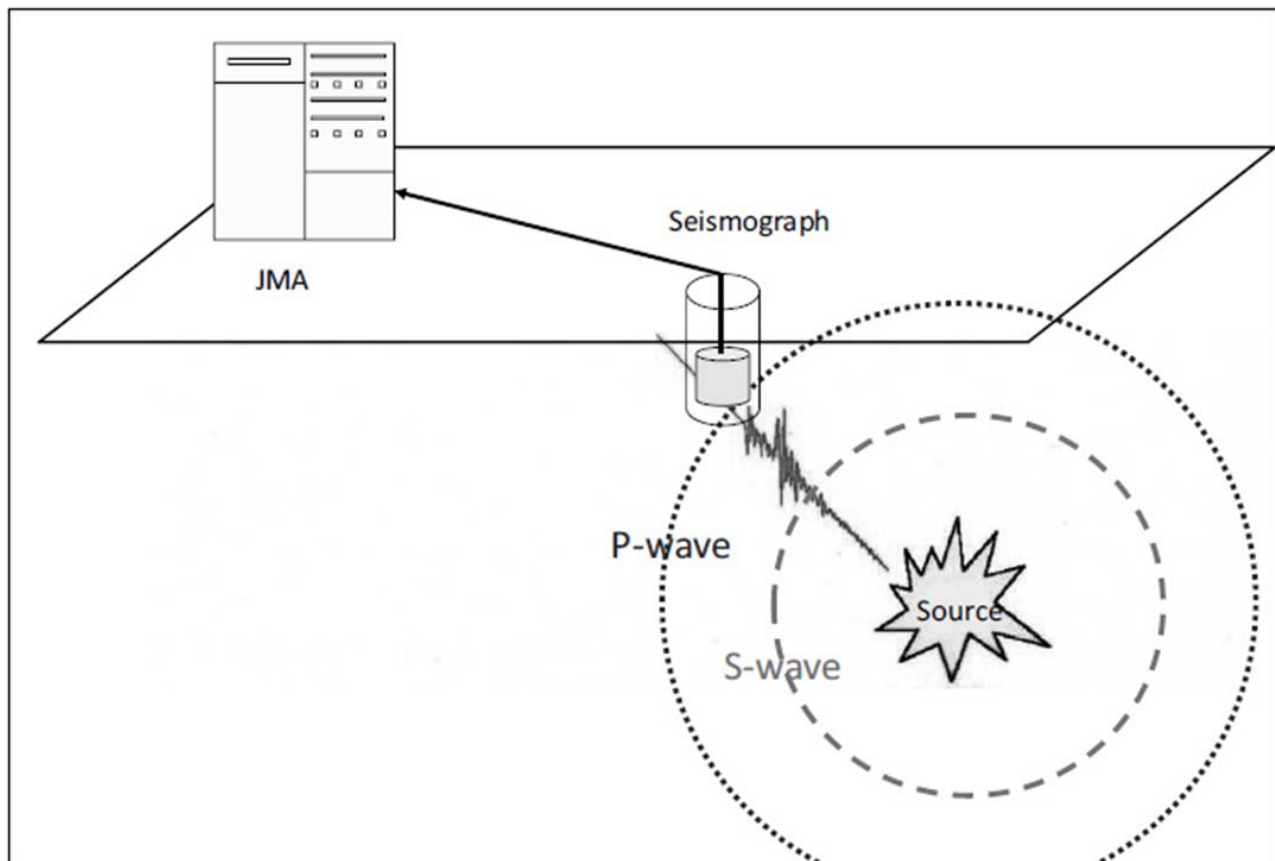


Figure 1 : Principle of the Earthquake Early Warning

圖 20 新世代（JMA- EEW 系統）

2. 新幹線地震預警系統設置情形

日本新幹線縱橫全國，主要有東海道、山陽、東北、上越、長野等路線，茲將地震預警系統設置情形說明如後：〔9〕

（1）JR 東海（東海道新幹線）

- 東京至新大阪間新幹線沿線，平均約每 20km 設置一地震偵測器，共設置 25 處，設定觸發等級為 40gal。
- 2005 年東海道新幹線之地震預警系統，為由遠距（coast line）地震偵測器及道旁（main line）地震偵測器組成之 TERRA-S 系統（採用 B- Δ 法，從地震偵測到完成地震參數之評估需 2 秒之時間）。

a. TERRA-S 系統（1）

（a-1）系統架構：

偵測遠距所發生之地震，對新幹線相關危害區域發出地震預警；及偵測新幹線沿線之地表加速度，直接對影響區域內發出告警之道旁地震偵測器（機械式、電子式各一）。

（a-2）系統功能：

強震發生時，將被遠距地震偵測器所偵測，利用 P 波資訊，評估震度及震央，將結果傳送至相關之沿線變電站設施，由變電站設施評估是否需發出告警，當確定時由變電站設施傳送觸發信號，將變電站斷電，並觸發區間內之列車緊急停車。

b. TERRA-S 系統（2）

- 日本東海道新幹線除了 TERRA-S 系統外，在 2008 年 11 月後，將氣象廳地震（JMA）速報系統資訊引進，作為行車運轉控制使用。
- TERRA-S 中繼所間設置地震速報接續處理裝置，並以 NTT 專線做為與氣象業務支援中心之傳輸路徑。地震速報接續處理裝置接收來自氣象業務支援中心之電文，並變換為與 TERRA-S 遠距地震偵測器相同格式之電文，傳送至新幹線沿線。變電站接收裝置，依據與遠距地震偵測器相同之作動，由地震規模與震央位置，判斷負責範圍內之影響，於必要時發出行車制控之信號。

東海道新幹線地震預警系統架構圖一

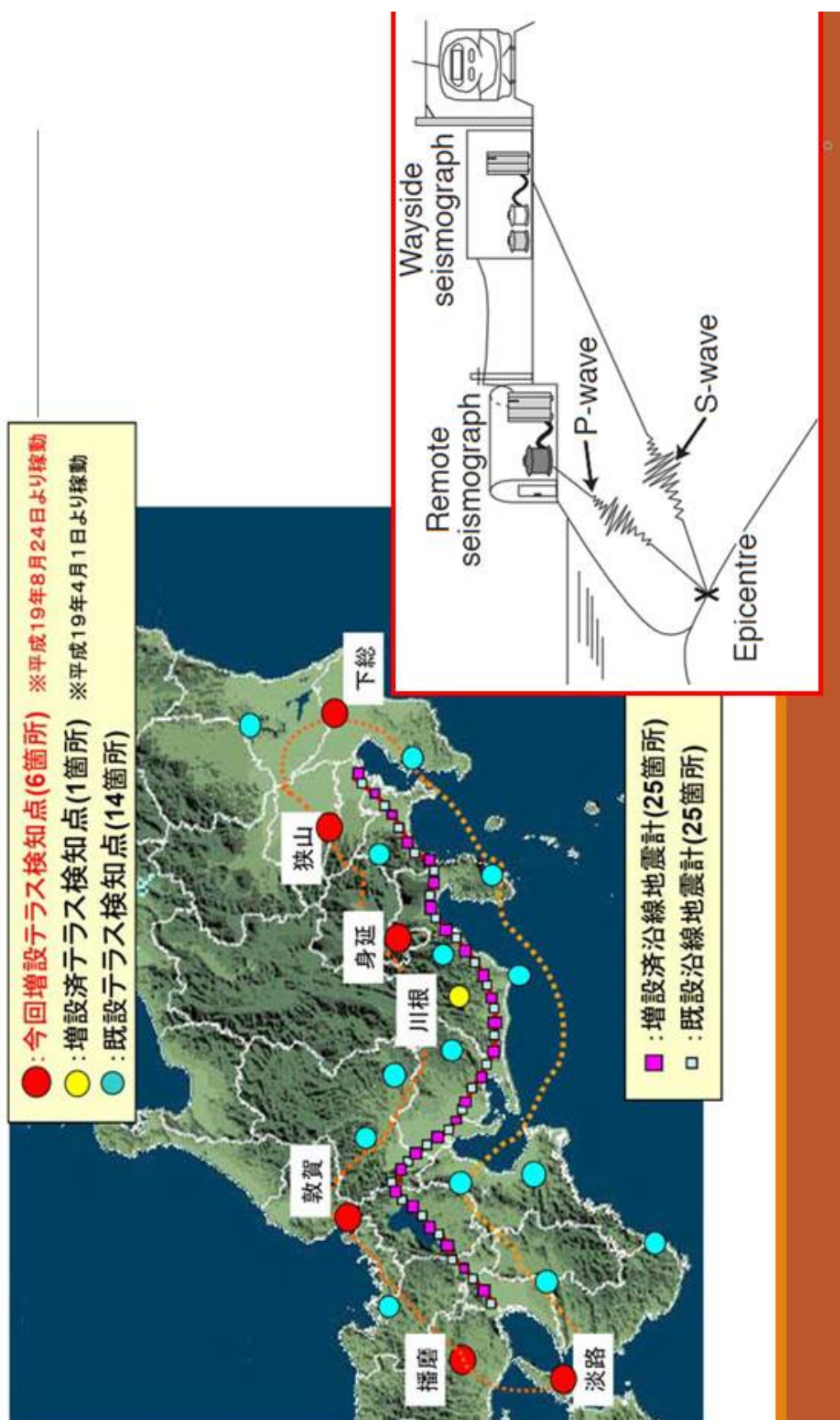


圖 21 東海道新幹線地震預警系統（架構圖 一）

東海道新幹線地震預警系統架構圖二

2008年之前

目前現況

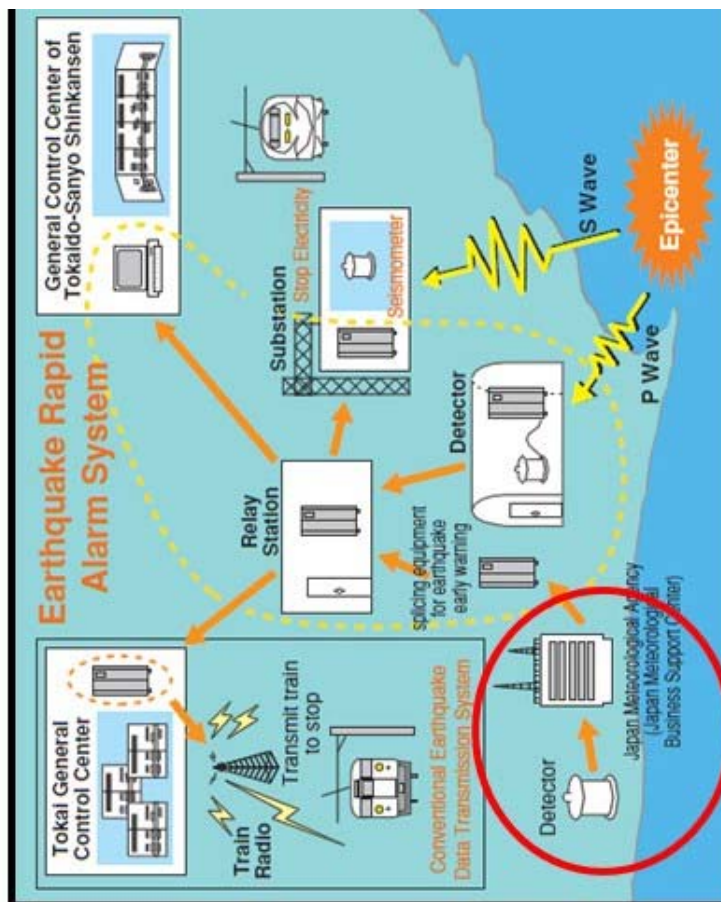
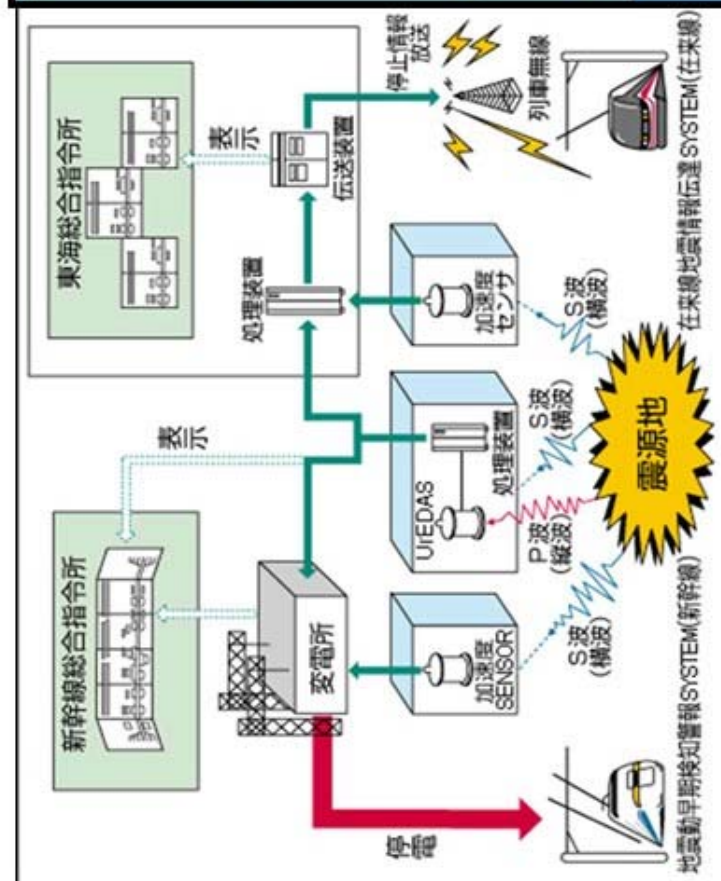


圖 22 東海道新幹線地震預警系統（架構圖 二）

東海道新幹線地震速報接續處理裝置架構圖

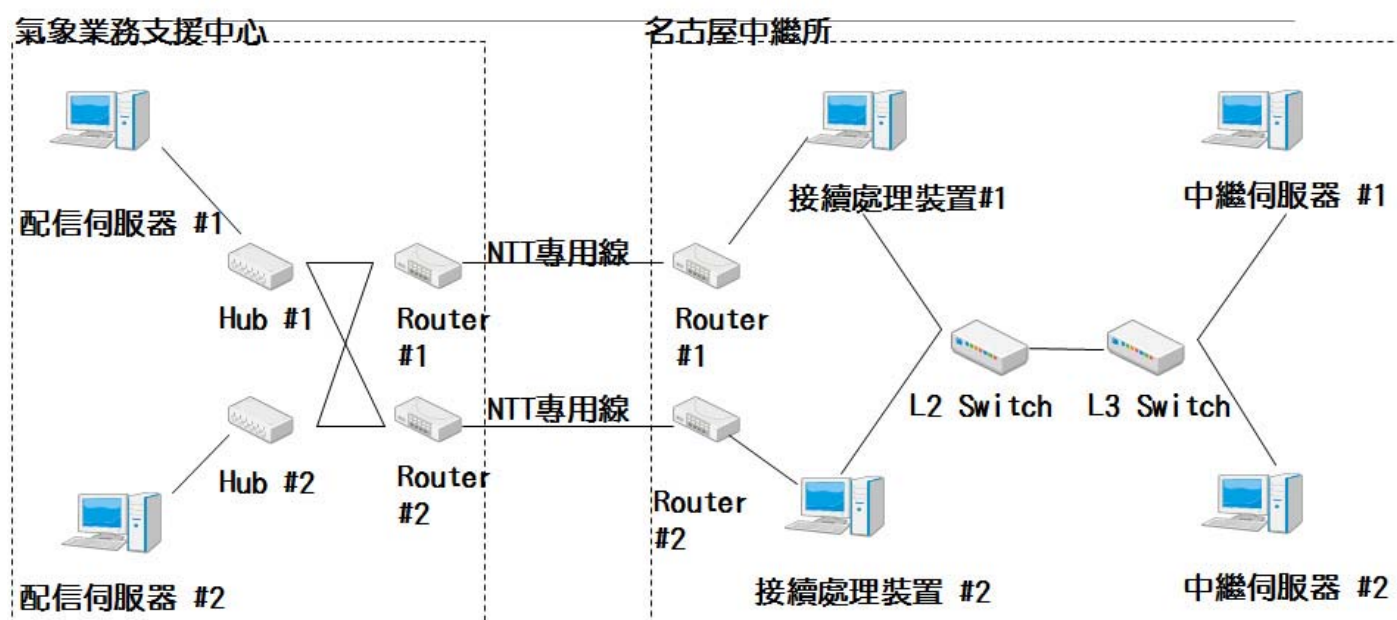


圖 23 東海道新幹線地震速報接續處理裝置架構圖

(2) JR 西日本（山陽新幹線）

- 新大阪至博多間新幹線沿線，1975 年於每 20km 變電所設置「對震列車防護系統」。
- 山陽新幹線於 1996 年採用 UrEDAS 系統。
- 1996 年設有遠距地震偵測器 5 處，2006 年遠距地震偵測器增為 10 處，沿線道旁地震偵測器有 23 處，平均約 20km 設置一處，併行使用。
- 為因應直下型震源，2010 年起道旁地震偵測器增設 20 處，目前共計 43 處，平均約 12km 設置一處。
- JR 西日本已於 2006 年 3 月，更新為 B- Δ 法之地震早期檢知系統
- 氣象廳之緊急地震速報系統已經運用在 JR 西日本之在來線上，山陽新幹線於 2010 年夏季導入氣象廳之地震速報系統。

JR西日本對應地震發生運作示意圖

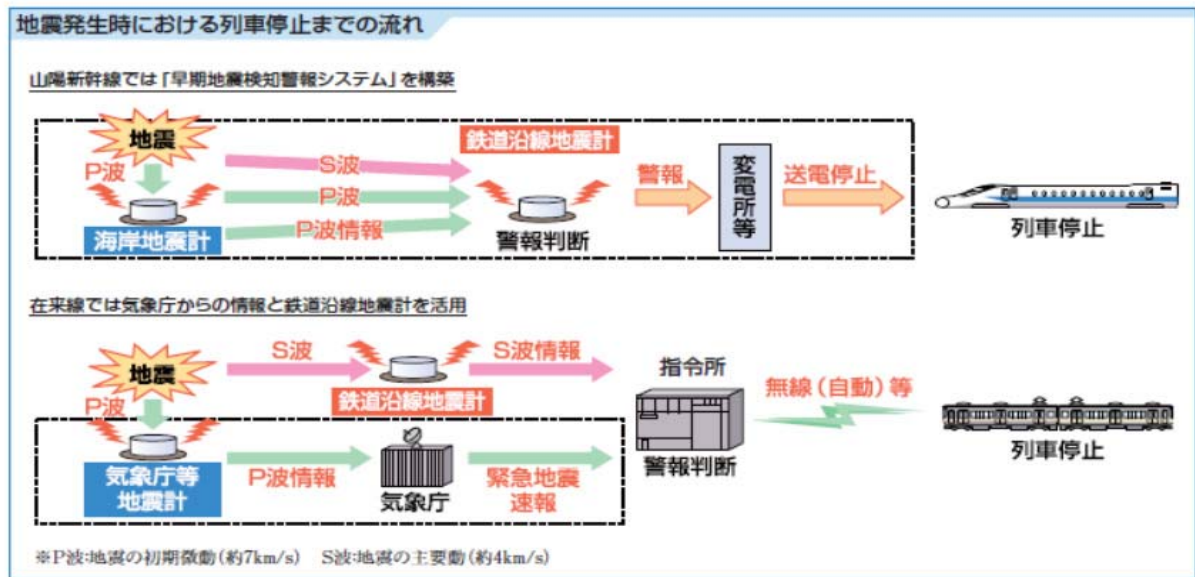


圖 24 JR 西日本對應地震發生運作示意圖

(3) JR 東日本（東北、上越、長野新幹線）

- 1982 年於東北新幹線設置沿線道旁地震偵測器 28 處，並自八戶至三浦半島設置 8 處遠距地震偵測器。
- 1996 年東北新幹線在太平洋側之遠距地震偵測器增為 9 處，另設 6 處遠距地震偵測器於日本海側，而沿線道旁地震偵測器目前已增至 44 處。
- 1998 年東北新幹線採用了新一代之 Compact UrEDAS 系統（警報處理時間 1 秒）。
- 上越新幹線，現設有沿線道旁地震偵測器 22 處。
- 長野新幹線，現設有沿線道旁地震偵測器 9 處。
- JR 東日本已於 2005 年 9 月，更新為 B- Δ 法之地震早期檢知系統。

(4) 新幹線地震預警系統精進措施

- 採用 B- Δ Algorithm。
- 增設道旁（main line）地震偵測器（自 20 km 間距縮至 10 km 左右）。
- 增設遠距（coast line）地震偵測器。
- 將氣象廳所提供之緊急地震速報資訊納入行車控制機制。

JR東日本地震偵測警報系統之發展現況

地震計設置箇所

設置箇所	線区等別	現行	増設数	合計
沿線	東北	28	16	44
	上越	13	9	22
	長野	6	3	9
	小計	47	28	75
海岸	太平洋側	9	-	9
	日本海側	6	-	6
	小計	15	-	15
合 計		62	28	90

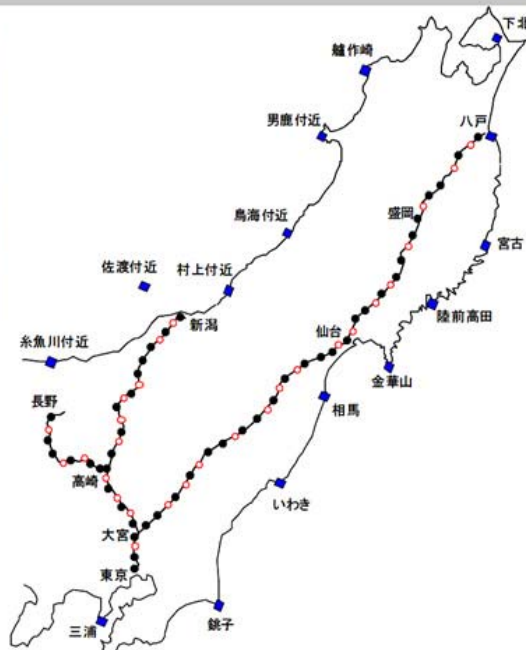


圖 25 JR 東日本地震偵測警報系統之發展現況圖

(六) 臺灣高鐵災害預警系統 (DWS) [10]

1. DWS 功能

臺灣高鐵災害預警系統 (Disaster Warning System)，英文縮寫簡稱為 DWS，其功能為達到事前預防及事後能儘早發現，並能在第一時間採取行動 (慢行或停止運轉)。DWS 系統在可能發生災害之地點裝置相關偵測器，以便及早偵測及預知災害之發生，並儘速採取適當防護措施，以確保列車運轉及旅客人員等之安全。

2. 監測與偵測設施項目

DWS 系統沿著高鐵工程 345 公里沿線，執行監測與偵測設施項目，包括：強風、豪雨、洪水、地震、異物入侵、邊坡滑動、落石等。災害預警系統依危險性作區分，又分為具立即危險性 (地震、道路車輛入侵、地滑、落石) 及無立即危險性 (強風、水位、雨量) 兩種。本研究僅就地震預警部分說明，以避免主題失焦。

災害類別

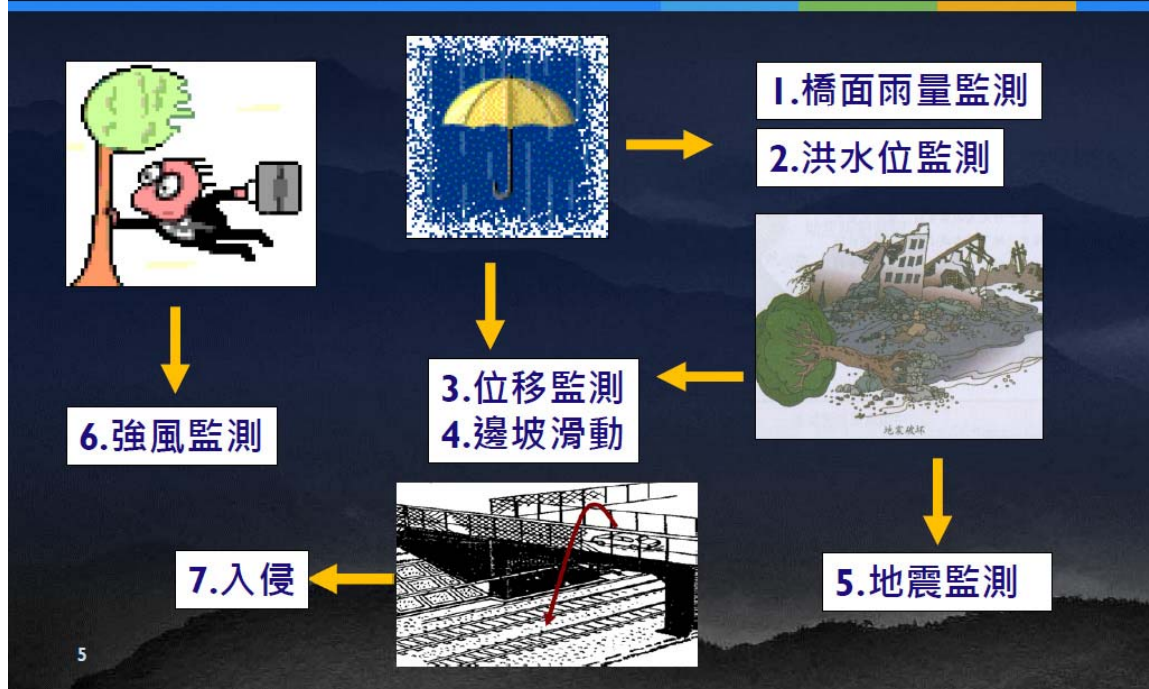


圖 26 高鐵災害及 DWS 示意圖 (1)

高鐵DWS示意圖

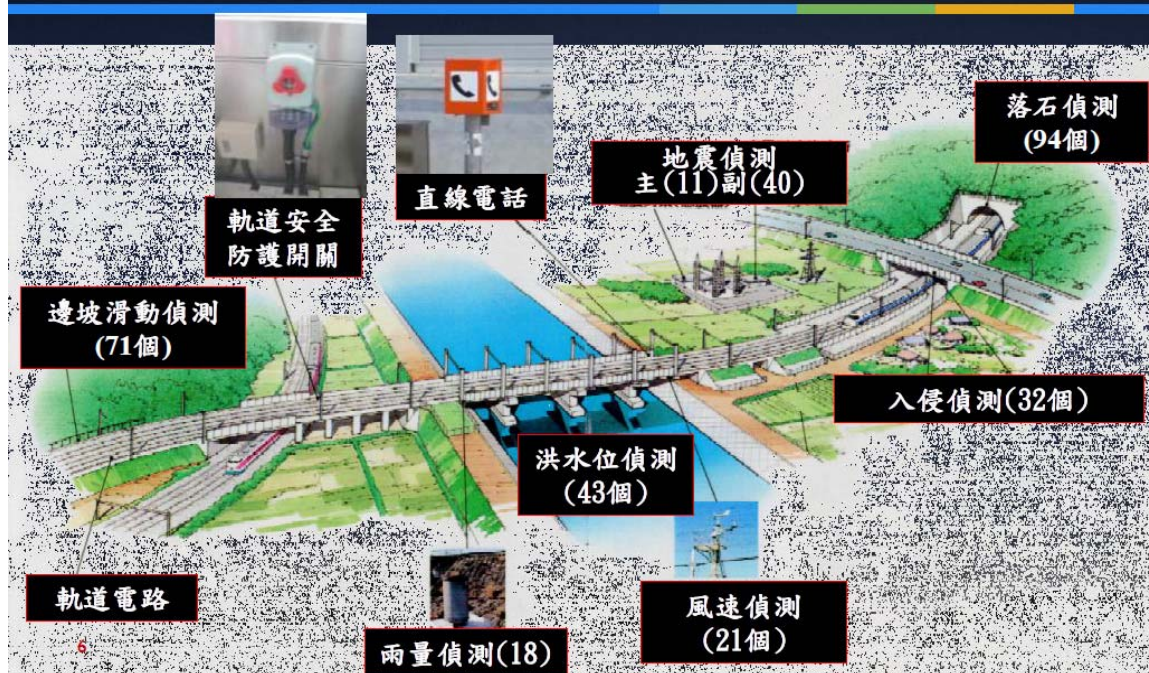


圖 27 高鐵災害及 DWS 示意圖 (2)

3. 地震偵測器建置

(1) 主地震偵測器 (Main Earthquake Sensor)

- 設置於 11 處號誌通訊機房中繼站 (ISCER) 內，平均間隔約 30 公里，採電子式與機械式並聯 (Fail-safe)。
- 用於控制列車運轉。
- 任一偵測器測到地表加速度達 40 gal，系統自動傳送訊號使列車自動啟動緊急煞車停車，行控中心 (OCC) 同時收到告警訊號，以便採取後續應變措施。

(2) 副地震偵測器 (Sub Earthquake Sensor)

- 設置於 40 處通訊號誌機房 (SCH)，平均間隔約 5 公里，採電子式。
- 用於控制列車運轉。

(3) 變電站地震偵測器

- 設置於 9 處變電站 (BSS)，採機械式。
- 任一偵測器測到地表加速度達 120 gal，系統自動斷電，待電力維修人員確認電力站機房及設備無受損，可恢復供電。

4. 高鐵地震告警系統「告警動作機制」

任何一個主地震偵測器偵測到地表加速度達 40 gal (相當於 4 級地震)，即自動通知受影響區間內之地面 ATC (Automatic Train Control system) 系統，並自動啟動該區間所有列車之緊急煞車 (非人為判斷及操作)，直至列車停車；另訊號同時傳遞至行控中心 (OCC)，供後續運轉調度之依據。

圖 28 高鐵地震告警系統



5. 高鐵地震災害行車限制與標準

- (1) 高鐵沿線共設置 51 處地震偵測器，這些偵測設備均有自我檢測功能，當任何異常或是設備故障時，皆有警訊傳至行控中心，控制員可立即處理以確保營運安全。
- (2) 當地表加速度到達 40 gal（相當於 4 級地震），主地震器感知後將立即發出訊號，號誌系統隨即啟動列車緊急停車機制。
- (3) 另當地表加速度到達 120gal，系統保護裝置將啟動變電站自動斷電機制，高鐵之地震警報觸發後處理標準如下表 4：

表 4 高鐵地震災害行車限制與標準

地震告警等級		地震告警影響 區間行車限制	實施 地面巡檢	實施隨乘巡檢逐步 提高速限恢復運轉	
等級	PGA	立即停止 列車運轉		注意 進行	最高臨時速限 70,170,230 km/h
1	$\geq 40\text{gal}$ $< 80\text{gal}$	震度 4 級 是 (25~80km/h)	無需辦理	視需要 辦理	應辦理
2	$\geq 80\text{gal}$ $< 120\text{gal}$	震度 5 級 是 (80~250km/h)	對受影響區域 實施地面巡檢	應辦理	應辦理
3	$\geq 120\text{gal}$	震度 5 級 是 (80~250km/h)	對受影響區域 實施地面巡檢 及檢查	應辦理	應辦理

(七) 新幹線與高鐵地震預警系統之比較

日本新幹線與臺灣高鐵工程，因計畫路線、地形、經費、需求不同，使用之地震預警系統功能亦有相異之處，列表如表 5。

表 5 新幹線與高鐵地震預警系統比較表

項次	項目名稱	新幹線地震預警系統 (EEW)	臺灣高鐵災害預警系統 (DWS)	說明
1	地震偵測器佈設區域	日本新幹線沿線及海岸線	臺灣西部高鐵沿線	臺灣高鐵未設置於海岸線
2	地震偵測器佈設間距	20 公里	30 公里	EEW 設置間距較短
3	使用震波	P 波 → S 波	S 波	使用震波完全不同
4	新幹線地震預警系統代別	第 4 代 → JMA EEW	第 1 - 2 代	使用代別不同
5	地震分析法	B- Δ Algorithm	—	
6	警報處理時間	約 1 秒 (Compact UrEDA)	未知	
7	地震告警標準	40 gal 以上	40 gal 以上	相同
8	發佈列車停止單位	JR (Japan Railways)	臺灣高鐵公司	均為營運公司
9	列車停止程序	地震偵測器 → JMA → 變電站 (BSS) → 新幹線列車 (停止)	ISCER (主地震偵測器) → ATC → 高鐵列車 (停止)	列車停止程序略為不同

四、研究內容（二）：鐵路邊坡預警監控機制

102 年 8 月底康芮颱風來襲時，臺鐵自強號列車在無預警情況下，於南迴線衝撞土石流，列車停駛於隧道內超逾三日難以動彈，嚴重響該線鐵路運輸，幸未造成旅客及人員傷亡。由於建置鐵路沿線邊坡預警系統，有其迫切性，鈞部於 102 年 9 月 5 日第 10 次業務會報紀錄指示辦理「鐵路邊坡預警監控機制」。^[11]

據了解，日本也有類似事故之發生。日本防災專家認為，豪雨（heavy rainfall）為鐵路邊坡滑動成災之主要因素，對於評估可能滑動之區段或地點，建議先行完成補強工程（reinforcing work），再因應豪雨配合建置「鐵路邊坡預警監控機制」。就列車行駛路線而言，日本已建置案例如後：

（一）JR 東日本建置路線及設備

東日本鐵道公司（East Japan Railway Company, EJ R）針對豪雨部分，已完成建置全線「鐵路邊坡預警監控機制」，全長約 7000 公里，雨量計（rain gauge）設置基準為每 10 公里 1 處（圖 29）。

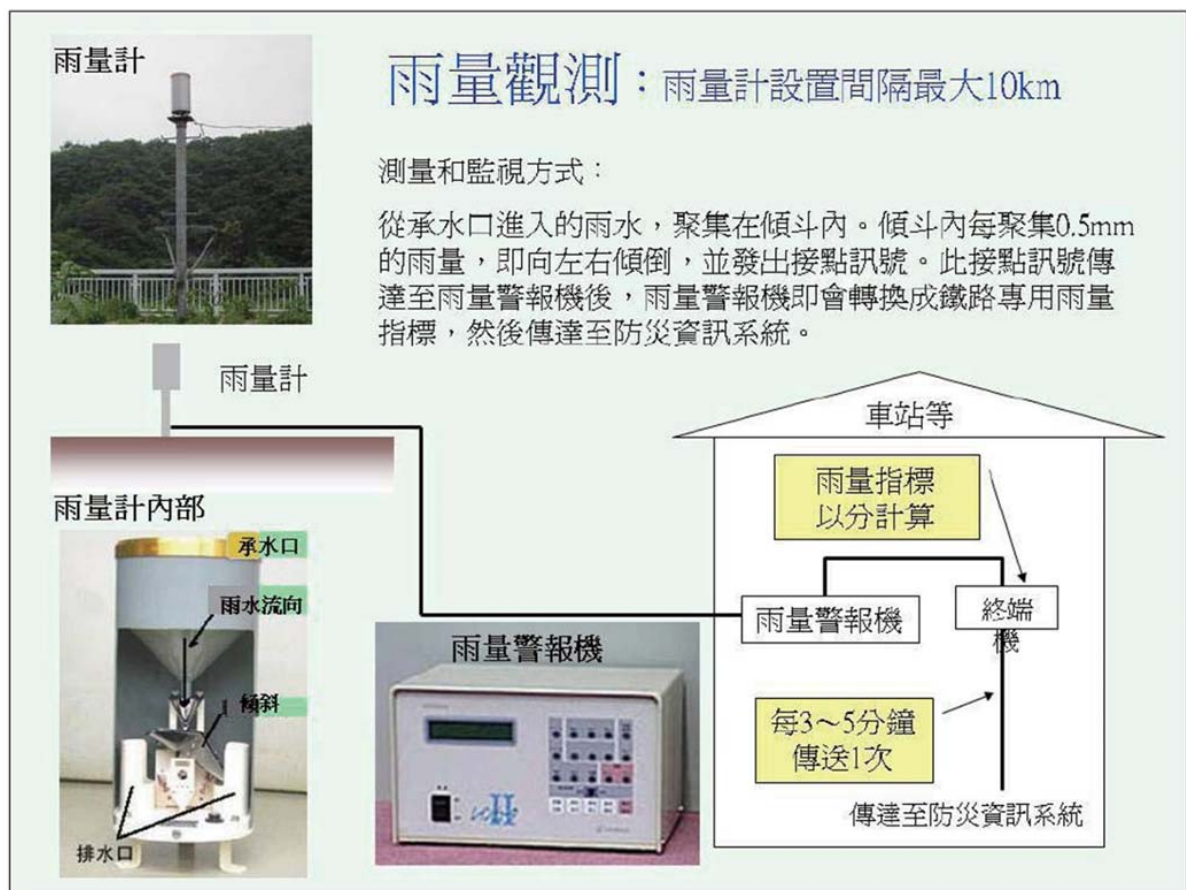


圖 29 雨量計之設置

（二）JR 東日本原預警臨界值及因應措施

面臨豪雨襲擊，EJR 三十年來鐵路列車停駛之預警臨界值（threshold）基準係採「時雨量」及「連續雨量」。而臺鐵局南迴路段，目前也有採取類似上述停駛基準，時雨量停駛臨界值為 40mm／時，連續雨量則為 130mm／日。日本「時雨量」及「連續雨量」之定義如後：

- 時雨量（HRAIN）：任意時間，1 小時前至此時止之降雨量總和。
- 連續雨量（CRAIN）：任意時間，無中斷降雨連續 12 小時以上至此時止，此期間連續降雨量之總和。

除以「時雨量」及「連續雨量」為鐵路停駛之基準外，並界分下列四項警戒等級（alert levels）及因應措施：

- 不需警戒（NO ALERT）：列車全速正常行駛。
- 觀察（WATCH）：列車正常行駛，觀察沿線軌道。
- 慢速（SLOW）：列車減速，駕駛並需謹慎行駛。
- 停駛（STOP）：列車持續駛至下一個車站，然後停止行駛，駕駛需格外謹慎警戒。

EJR 原降雨量運轉規定

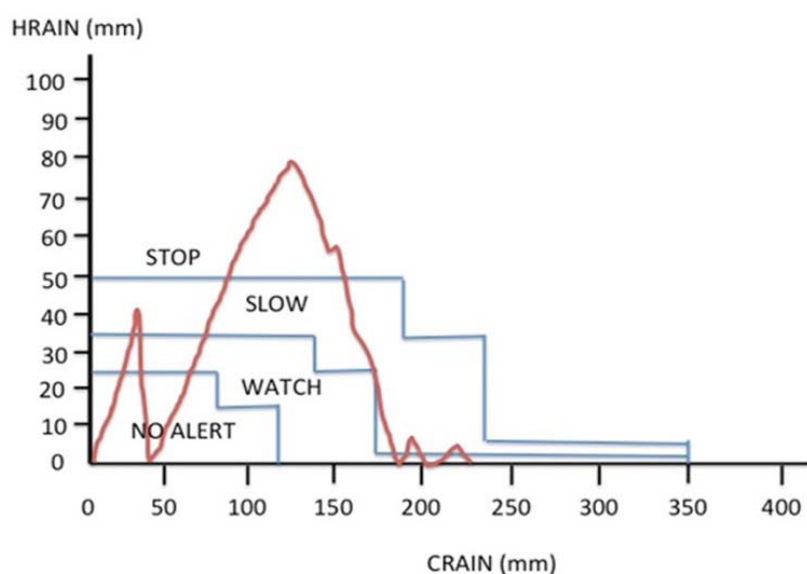


圖 30 EJ R 原有因應措施

(三) JR 東日本新預警臨界值

JR 東日本原臨界值預警基準採「時雨量」及「連續雨量」之作法，據研究顯示：面臨間歇性豪雨時，易有錯誤警報過多之困擾；且連續雨量之計算值，常有不準確之誤差情形發生。因此，EJR 多年前即著手研究新預警臨界值，經研究使用半衰期（half life）模式，也提出新「有效累積雨量」計算公式。

1. 新「有效累積雨量」計算公式

$$R(t) = Y(t) + 0.5^{t/h} R(t-1)$$

$R(t)$ ：在時間 t 時之有效累積雨量。

$Y(t)$ ：在時間 t 時之降雨強度。

h ：半衰期。

2. 最佳半衰期處理原則

- 不將半衰期視為單一確定值，而視為一分布量（隨機變數）。
- 不以各區間，而以全區間之平均值決定最佳半衰期之分布。
- 已分散之複數半衰期組合，模擬連續性半衰期之分布。
- 不僅依據災害歷史數據資料，且參考耐雨之實績，再決定新的臨界值。

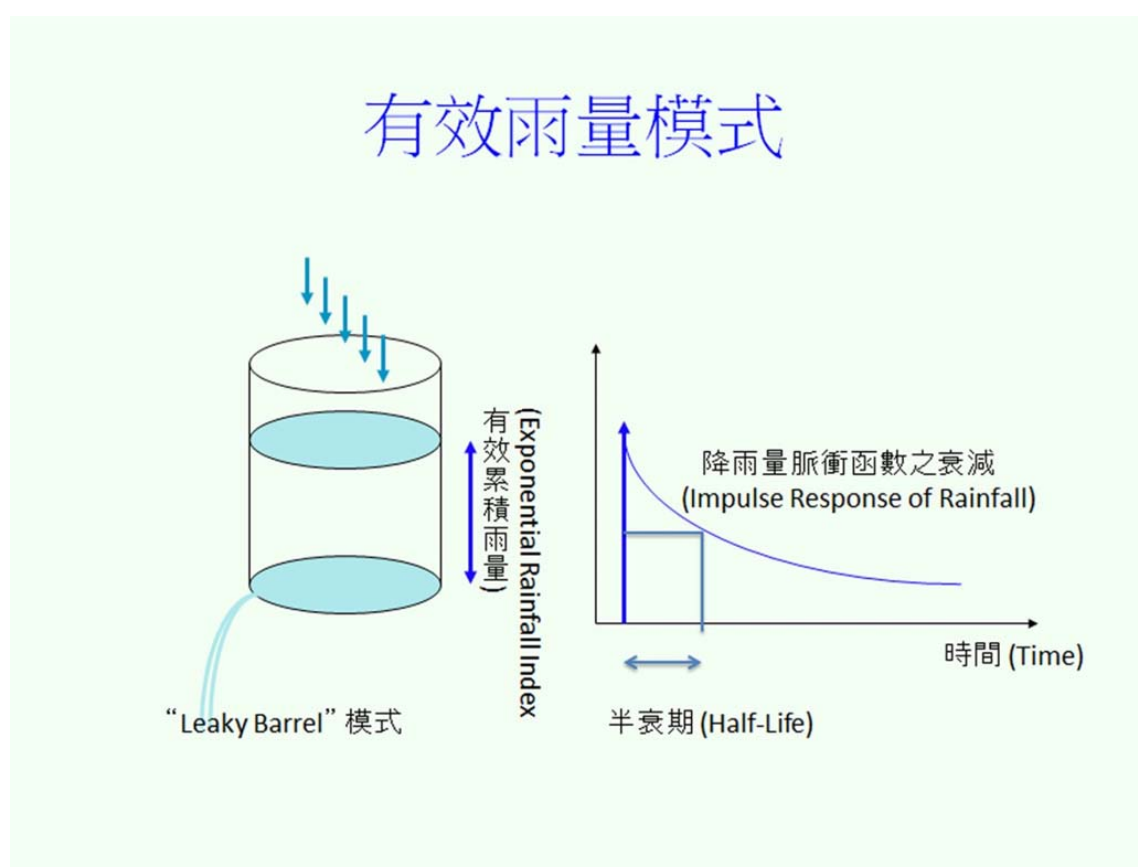


圖 31 有效雨量模式

3. 決定最佳半衰期

- EJR 依據 25 年災害歷史數據資料，建構最佳半衰期分布圖如圖 32。
- 提出 1.5 時、6 時、24 時為最佳半衰期，及其對應之預警臨界值雨量。

半衰期(小時)	1.5	6	24	96
比例 (%)	30%	26%	23%	21%

表 6 最佳半衰期分布比例

EJR 依據災害數據構成之
最佳半衰期分布圖



圖 32 最佳半衰期分布圖

(四) JR 東日本之天然災害管制系統

1. 處理程序

JR 東日本面對豪雨、地震、疾風，已全線設置風速計 (Anemometer)、雨量計 (Rain Gauge)、地震儀 (Seismometer)，並建構「天然災害管制系統」如圖。依據該系統管制程序，行控中心 (Control Center) 接獲全線路段之豪雨量超逾 1.5 時、6 時、24 時之預警臨界值時，即立即通知該路段列車停止行駛。

2. 系統特色

- 系統設備無專利 (patent) 問題。
- 系統建置及維護費用低 (雨量計建置費用，約為一處 40 萬日幣)。
- 系統可自動傳輸資料。

3 種半衰期臨界值設定及警報

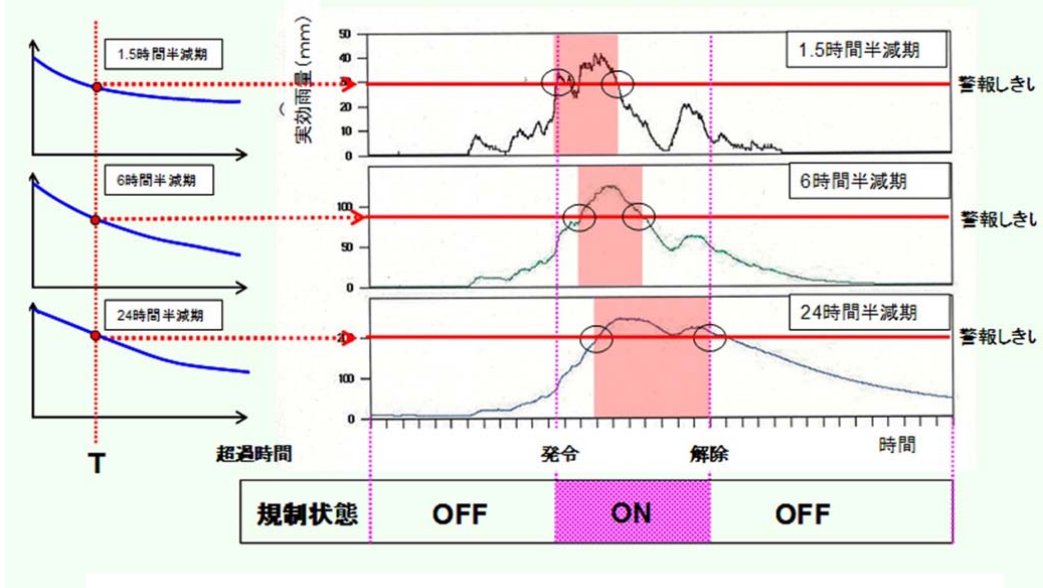


圖 33 3 種半衰期臨界值及警報

使用3種半衰期有效累積雨量 實施運轉管制之螢幕畫面

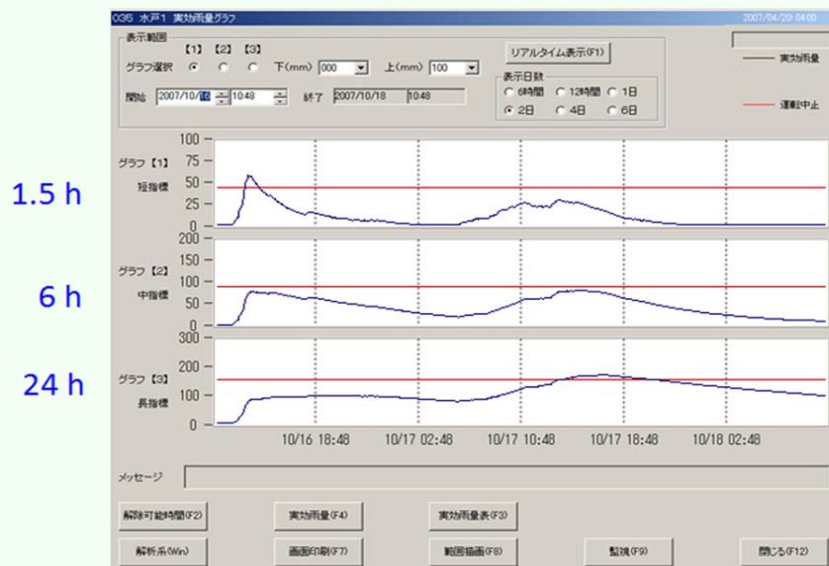


圖 34 監控螢幕實際畫面

五、研究內容（三）：鐵路長隧道防災

（一）隧道安全概念（Tunnel safety concepts）

鐵路長隧道防災作業之首要工作，為釐定安全概念（Tunnel Safety Concepts），涵蓋內容為隧道斷面型式、隧道內部直徑、救援車站數量與距離、橫向聯接通道間距等相關議題，茲分述如後：

1. 隧道斷面形式（Type of Cross-Section）

無庸置疑，鐵路隧道斷面形式之選定，對整體防災體系之建立，具有關鍵性之影響。在現今歐洲及日本鐵路強權國家，對於「單孔雙軌隧道」(One double-track tunnel) 及「雙孔單軌隧道」(Two single-track tunnels) 兩種斷面形式，仍存有爭議 (argument)。部分歐洲專家認為，「雙孔單軌隧道」較「單孔雙軌隧道」安全。然而，採用「雙孔單軌隧道」斷面形式，經費之增高及對環境之較高衝擊，卻是無法避免。〔12〕

（1）單孔雙軌隧道（One double-track tunnel）

單孔雙軌隧道係單孔隧道內佈設雙軌，較「雙孔單軌隧道」擁有下列實質優點（圖 35）。

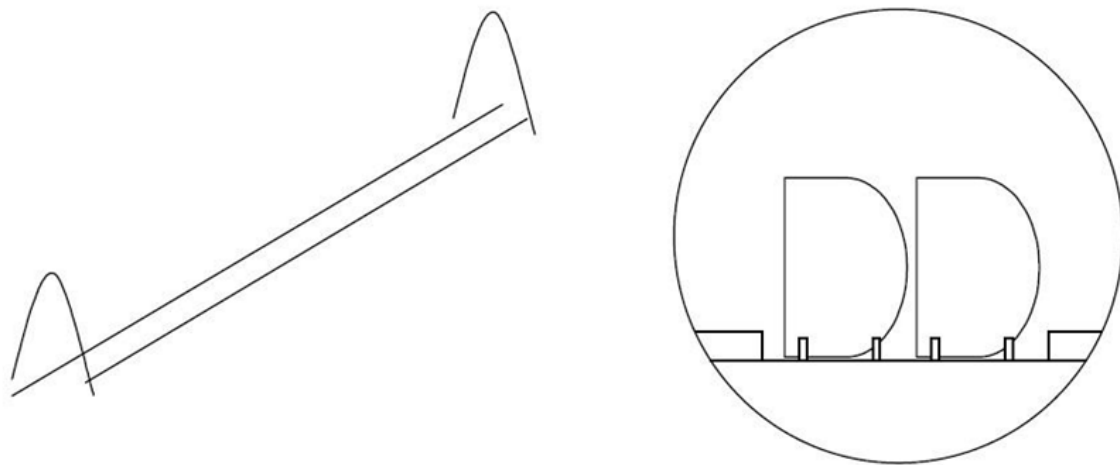
- 建造期間，較少之工作面（work faces）。
- 較少之土石方（mass）需移除。
- 需確保之岩石面（rock surfaces）量較少。
- 較低之工程經費（construction cost）。

單孔雙軌隧道，其斷面積較雙孔單軌隧道大，約為 80 - 115 平方公尺，因此具有較高之隧道空氣量（air volumes）。雙軌單軌隧道通常視防災需求，配合建造一個或更多之救援車站（rescue station）及搭載相關聯接通道。

由於雙向列車行駛，使自然通風方向較難以預測，但是有較高之隧道空氣量，對於火源附近之煙霧分層（smoke stratification）處理較佳。

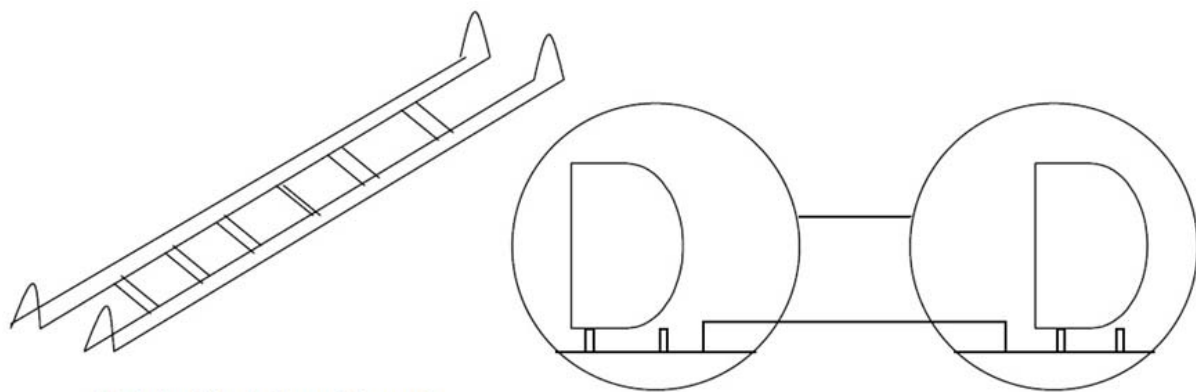
（2）雙孔單軌隧道（Two single-track tunnels）

單孔隧道內僅佈設單軌，且有二條平行隧道，即雙孔單軌隧道（圖 36）。經常有設置救援車站（rescue station）及必要之橫向通道（Cross-passage）。另通風量及方向較易預測，由於斷面較小，隧道煙霧之漫延將更形快速。有歐洲專家認為，雙孔單軌隧道適合特別長之鐵路隧道，約 20 公里以上。



Sketch of double track in single bored tunnel concept

圖 35 單孔雙軌隧道



Sketch of twin bored tunnel

圖 36 雙孔單軌隧道

(3) 鐵路隧道斷面形式案例

縱然使用「單孔雙軌隧道」(One double-track tunnel)及「雙孔單軌隧道」(Two single-track tunnels)兩種斷面形式，仍未有定見，個人認為瞭解目前世界各國之使用情形(詳如附表7)，較具實務價值。〔13〕

表 7 鐵路隧道斷面形式案例

隧道名稱	位 置	長 度	啟用時間	現 況	隧道使用斷面
1. Gotthard	瑞 士	57 公里	預定 2017	施工中	雙孔單軌
2. Brenner	澳大利- 意大利	56 公里	預定 2020	規劃中	雙孔單軌
3. Seikan	• 日 本	53.85 公里	1988	啟 用	• 單孔雙軌
4. Lyon-Turin	法國- 意大利	53 公里	預定 2020	設計中	雙孔單軌
5. Channel	英國- 法國	50 公里	1994	啟 用	雙孔單軌
6. Gibraltar	西班牙- 摩洛哥	37.7 公里	未 定	規劃中	雙孔單軌
7. Lotschberg	瑞 士	34.6 公里	2007	啟 用	雙孔單軌
8. Koralm	澳大利	32.8 公里	預定 2022	設計中	雙孔單軌
9. Guadarrama	西班牙	28.4 公里	2007	啟 用	雙孔單軌
10. Hakkoda	• 日 本	26.5 公里	2010	啟 用	• 單孔雙軌
11. Iwate-Ichinohe	• 日 本	25.8 公里	2002	啟 用	• 單孔雙軌
12. Pajares	西班牙	24.7 公里	2013	啟 用	雙孔單軌
13. Prague-Beroun	捷 克	24.7 公里	預定 2016	施工中	雙孔單軌
14. Iyama	• 日 本	22.2 公里	2013	啟 用	• 單孔雙軌
15. Wushaoling	中 國	21.05 公里	2006	啟 用	雙孔單軌
16. Vereina	瑞 士	19 公里	1999	啟 用	一孔單軌 一孔雙軌
17. CTRL(London)	英 國	19 公里	2007	啟 用	雙孔單軌
18. Vaglia	• 意大利	18.7 公里	2009	啟 用	• 單孔雙軌
19. Qingling	中 國	18.5 公里	2002	啟 用	雙孔單軌
20. Ceneri	瑞 士	15.4 公里	預定 2018	施工中	雙孔單軌
21. Firenzuola	• 意大利	15.2 公里	2010	啟 用	• 單孔雙軌
22. Wienerwald	澳大利	13.4 公里	2012	啟 用	雙孔單軌 10.75 公里； 單孔雙軌 2.37 公里

23. Bussoleno	法國-意大利	12.5 公里	預定 2020	規劃中	雙孔單軌
24. Lainzer	奧地利	10.6 公里	2012	啟 用	雙孔單軌 2.3 公里； 單孔雙軌 8.3 公里
25. Katzenberg	德 國	9.4 公里	2012	啟 用	雙孔單軌
26. Zimmerberg	• 瑞 士	9.4 公里	2003	啟 用	• 單孔雙軌
27. Perthus	西班牙-法國	8.3 公里	2013	啟 用	雙孔單軌
28. Storebaelt	丹 麥	8 公里	1997	啟 用	雙孔單軌
29. Marseilli	• 法 國	7.8 公里	2001	啟 用	• 單孔雙軌
30. Abdalajis	西班牙	7.3 公里	2007	啟 用	雙孔單軌

2. 鐵路隧道內部直徑

選定隧道斷面形式時，須併同考量隧道內部直徑，案例資料如附表 8。

表 8 鐵路隧道內部直徑案例

隧道名稱	位 置	長 度	速 度	現 況	隧道 內部直徑
1. Gotthard	瑞 士	57 公里	250(公里/小時)	預定 2017 啟用	8.3 公尺
2. Seikan	日 本	53.85 公里	150(公里/小時)	1988 啟用	7.85 公尺
3. Channel	英國-法國	50 公里	160(公里/小時)	1994 啟用	7.6 公尺
4. Lotschberg	瑞 士	34.6 公里	250(公里/小時)	2007 啟用	8.4 公尺
5. Guadarrama	西班牙	28.4 公里	350(公里/小時)	2007 啟用	8.5 公尺
6. Pajares	西班牙	24.7 公里	350(公里/小時)	2010 啟用	8.5 公尺
7. CTRL(London)	英 國	19 公里	270(公里/小時)	2007 啟用	7.15 公尺
8. Katzenberg	德 國	9.4 公里	250(公里/小時)	2012 啟用	9.4 公尺
9. Perhus	西班牙-法國	8.3 公里	300(公里/小時)	2013 啟用	8.7 公尺
10. Storebaelt	丹 麥	8 公里	160(公里/小時)	1997 啟用	7.7 公尺
11. Abdalajis	西班牙	7.3 公里	350(公里/小時)	2007 啟用	8.8 公尺

3. 鐵路隧道橫向通道間距

採用「雙孔單軌隧道」斷面形式，常有設置橫向通道（案例如表 9）

表 9 鐵路隧道橫向通道間距

隧道名稱	長 度	現 況	隧道使用斷面	橫向通道間距/或 離逃生口距離
1. Perthus	8.3 公里	2013 啟用	雙孔單軌	200 公尺
2. Storebaelt	8 公里	1997 啟用	雙孔單軌	250 公尺
3. Guadarrama	28.4 公里	2007 啟用	雙孔單軌	250 公尺
4. Ceneri	15.4 公里	預定 2018 啟用	雙孔單軌	320 公尺
5. Gotthard	57 公里	預定 2017 啟用	雙孔單軌	325 公尺
6. Lutschberg	34.6 公里	2007 啟用	雙孔單軌 (部分單軌)	333 公尺
7. Brenner	56 公里	預定 2025 啟用	雙孔單軌	333 公尺
8. Abdalajis	7.3 公里	2007 啟用	雙孔單軌	350 公尺
9. Channel	50 公里	1994 啟用	雙孔單軌 (加服務隧道)	375 公尺
10. Lyon-Turin	53 公里	預定 2020 啟用	雙孔單軌	400 公尺
11. Bussoleno	12.5 公里	預定 2020 啟用	雙孔單軌	400 公尺
12. Koralm	32.8 公里	預定 2022 啟用	雙孔單軌	500 公尺
13. Katzenberg	9.4 公里	2012 啟用	雙孔單軌	500 公尺
14. Wienerwald	13.35 公里	2012 啟用	雙孔單軌 10.75 公里； 單孔雙軌 2.37 公里	500 公尺
15. Seikan	53.85 公里	1988 啟用	• 單孔雙軌	600 公尺
16. CTRL(London)	19 公里	2007 啟用	雙孔單軌	750 公尺
17. Lainzer	10.6 公里	2012 啟用	雙孔單軌 2.3 公里 單孔雙軌 8.3 公里	逃生口 120-599 公尺設一處
18. Vaglia	18.7 公里	2009 啟用	• 單孔雙軌	逃生口 4500 公尺 以上設一處
19. Firenzuola	15.2 公里	2010 啟用	• 單孔雙軌	逃生口 5000 公尺 以上設一處
20. Marseille	7.8 公里	2001 啟用	• 單孔雙軌	沒有逃生口
21. Vereina	19 公里	1999 啟用	一孔單軌 一孔雙軌	沒有逃生口

4. 日本不停隧道之緣由

(1) 日本嚴禁列車停駛隧道之緣由

1972 年日本發生「北國列車火災事故」，依據日本國鐵資料記載，1972 年 11 月 6 日一班 501 號由大阪開往青山之北國高速列車，於該日凌晨 1 時 4 分 30 秒開車，車上搭載者 761 位乘客及 30 位乘務員，列車不幸於凌晨 1 時 9 分發生火災事故。

列車於凌晨 1 時 13 分停車，並以無線電緊急通知車站及用滅火器迅速滅火；然而火勢及濃煙過大，無法立即撲滅，救援列車直到凌晨 7 時 10 分始進入火災現場，本次火災事故最後造成 30 人死亡及 714 人受傷之慘劇。起火原因為餐車電線斷路所致，法院認為若列車不停車，而能繼續開車及持續滅火，死傷人數可能不會如此殘重。

本次火災事故，也突顯了隧道無照明、未利用斜坑逃生、列車車廂未有廣播設備、濃煙過大難以行動等重大防災瑕疵。歷經此次火災事故之殘痛教訓，日本列車於發生事故時，嚴禁列車停駛於隧道內，須全力駛出隧道外，並迅速求取人員生命及列車安全。〔14〕

(2) 鐵路隧道救援車站數量及間距

雖然日本有嚴禁列車停駛於隧道內之政策，不過對於 20 公里以上之長隧道，卻有須設置救援車站之考量與實質需求(案例如表 10)。〔15〕

表 10 鐵路隧道救援車站數量及間距

隧道名稱	長 度	救援車站數量	救援車站之位置或間距
1. Gotthard	57.0 公里	2	2 救援車站 間距 16 公里
2. Seikan	53.85 公里	2	2 救援車站 間距 23 公里
3. Guadarrama	28.4 公里	1	救援車站位於 隧道中間
4. Taihangshan	27.84 公里	2	2 救援車站 間距 15.6 公里
5. Wushaoling	21.05 公里	1	救援車站位於 隧道中間

（3）鐵路隧道救援車站通道距離

列車進入救援車站，須配合使用通道，其設置間距（案例如表 11）。

表 11 鐵路隧道救援車站通道距離

隧道名稱	救援車站長度	救援車站通道間距
1. Seikan	600 公尺	40 公尺
2. Gotthard	516 公尺	86 公尺
3. Guadarrama	500 公尺	50 公尺
4. Wushaoling	560 公尺	70 公尺
5. Taihangshan	600 公尺	60 公尺

（二）隧道風險評估（Tunnel risk assessment）

建造鐵路長隧道複雜過程中，隧道風險評估（Tunnel risk assessment）為不可或缺之重要一環，其安全分析及概念，將提供未來營運者（Operator）安全之高度確保。然而，目前尚未有專屬（specific）評估方法，可供直接採用。〔16〕

1. 安全分析（Safety analysis）

主要分為定性安全分析（Qualitative safety analysis）及定量風險分析（Quantitative risk analysis）二步驟，這是較無爭議性。

（1）定性安全分析（Qualitative safety analysis）

定性安全分析主要為界定限制事故（accident）及情境（scenarios）發生之範圍，及鑑識（identify）該隧道工程合適之安全設施（safety measures）。同時需明瞭國內使用規章標準（criteria），以及國外使用之標準（norms）及相關規定（regulations），以利執行。

（2）定量風險分析（Quantitative risk analysis）

若前步驟（1）定性安全分析，有未完成鑑識該隧道工程合適之安全設施，需持續進行。定量風險分析，因需使用國內外統計數據（statistical data），因此每一事故發生之次數及結果，都需數據化。且應考量使用安全設施後之影響（effects）。

進行本項分析時，下列重要事例（critical events）需納入評量。

- 鐵路事故（Industrial accidents）
- 涉及之事故及受傷者（含旅客及其他）
- 火災（含各型列車）

- 出軌 (Derailments)
- 碰撞 (Collisions)
- 危險物損失 (Losses of hazardous goods)
- 操作失誤 (Operation failures)
- 恐怖攻擊及暴力 (Terrorism/violence)

2. 事故分析程序 (Analysis procedure)

對於危險情境之事故分析，通常使用事件樹 (Event trees) 分析法。事件樹分析法係針對所敘述之事故情境 (accidental scenarios) 呈現一明確之程序，另包含不同變數及記錄時間。事件樹也依據可用的數據，專家意見及工程判斷 (engineering judgment) 評估其事件發生率 (probabilities)。

事故風險分析程序詳如圖 37。針對隧道設計及有關既往之鐵路事故，需首先加以鑑識 (identify) 最重要且危險者。其次，對每一被選定者需評估可能對旅客及設施等之傷害 (damages)。結果分析 (consequence analyses) 可能需應用複雜工具，來確認事故情境於限定工程環境 (confined environment) 之影響程度。安全設施分析，則涵蓋各個設施對隧道之實際效能 (performance) 評估。〔17〕

(三) 青函隧道 (Seikan Tunnel)

1. 青函隧道概述

青函隧道 (Seikan Tunnel) 為日本 JR 在來線本州通往北海道之重要交通運輸門戶，南起本州北端津輕半島之今別町濱名，穿越津輕海峽後銜接至北海道南端松前半島之知內町湯之里，全長 53.85km，屬海底長隧道。由於隧道長度較長，其縱坡為 U 型設計，列車無法藉重力滑出隧道與等待外界救援，因此整座隧道緊急逃生規劃概念，需緊密設想於隧道中整列車乘客疏散避難之容量與功能，即於隧道內需規劃自救及與救援系統，以利於最短時間內疏散及搶救乘客，並使人員傷亡及隧道設施損失降至最低。

該隧道自 1946 年開始進行初步調查工作，1964 年動工，1985 年完工，工期長達 21 年，為世界知名之長型海底隧道。自青函隧道通車後，除可大幅縮減了本州至北海道間之交通時間，並提供一條較為安全且不受天候影響之交通路線。以青森至函館而言，交通時間由原來海運所需之三小時五十分鐘縮短至二小時，而新幹線通車後，則可縮減為五十分鐘，對北海道及青森附近地區之經濟發展助益頗大。本隧道於 1988 年 3 月正式通車營運，

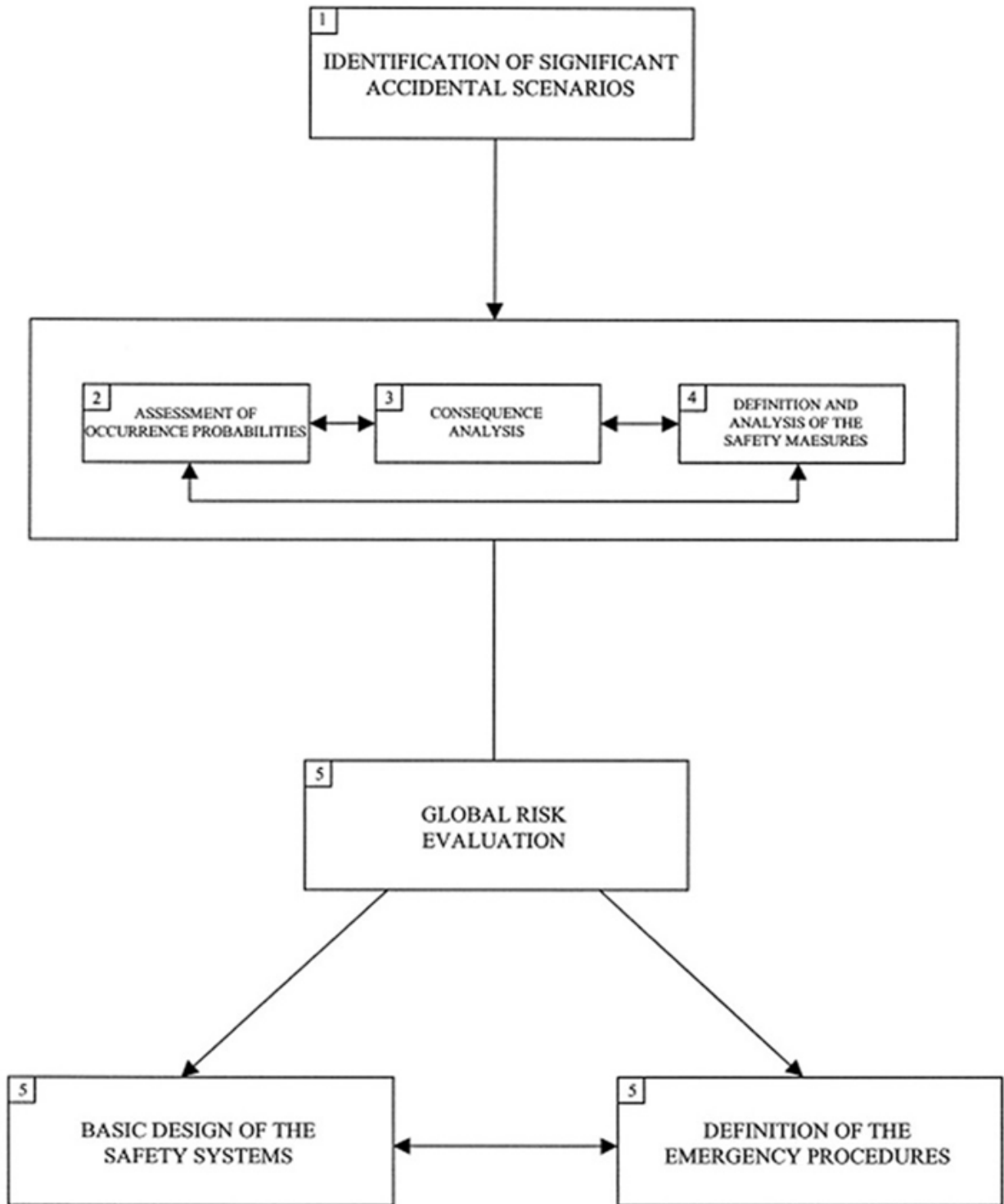


Illustration of risk-analysis procedure.

圖 37 事故風險評估程序

其間設龍飛（Tappi）與吉岡（Yoshioka）兩處緊急停靠站，目前僅供一般鐵路通行，未來北海道新幹線預定於 105 年 3 月開通。

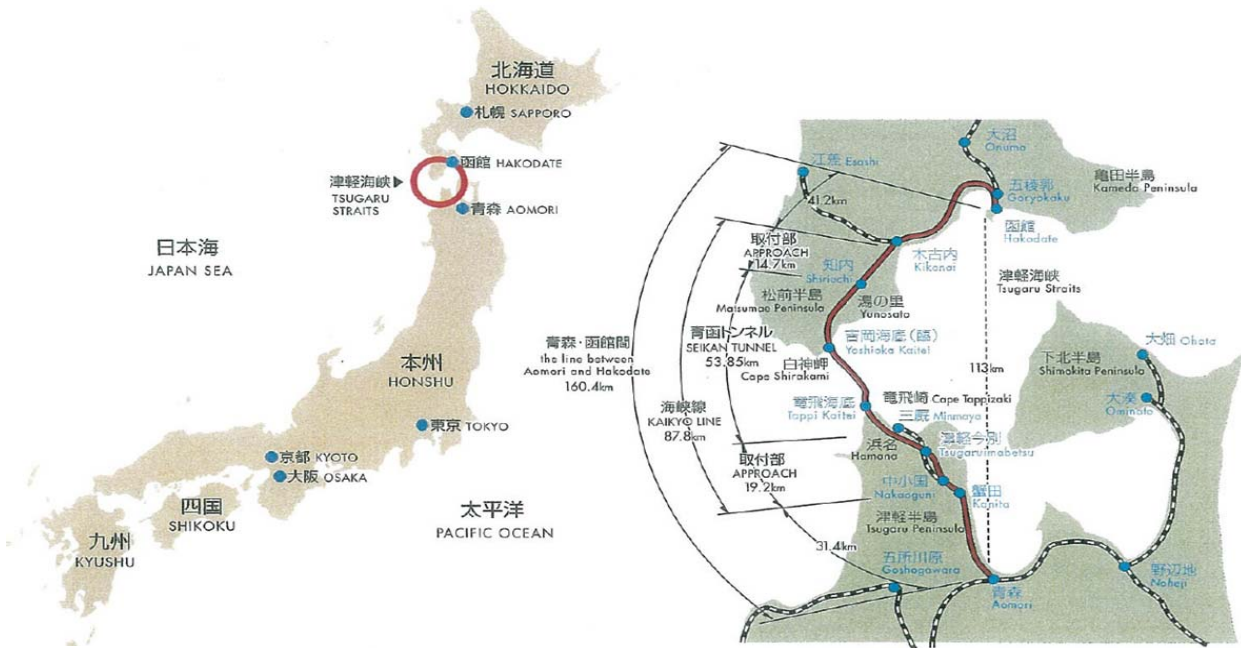


圖 38 青函隧道地理位置

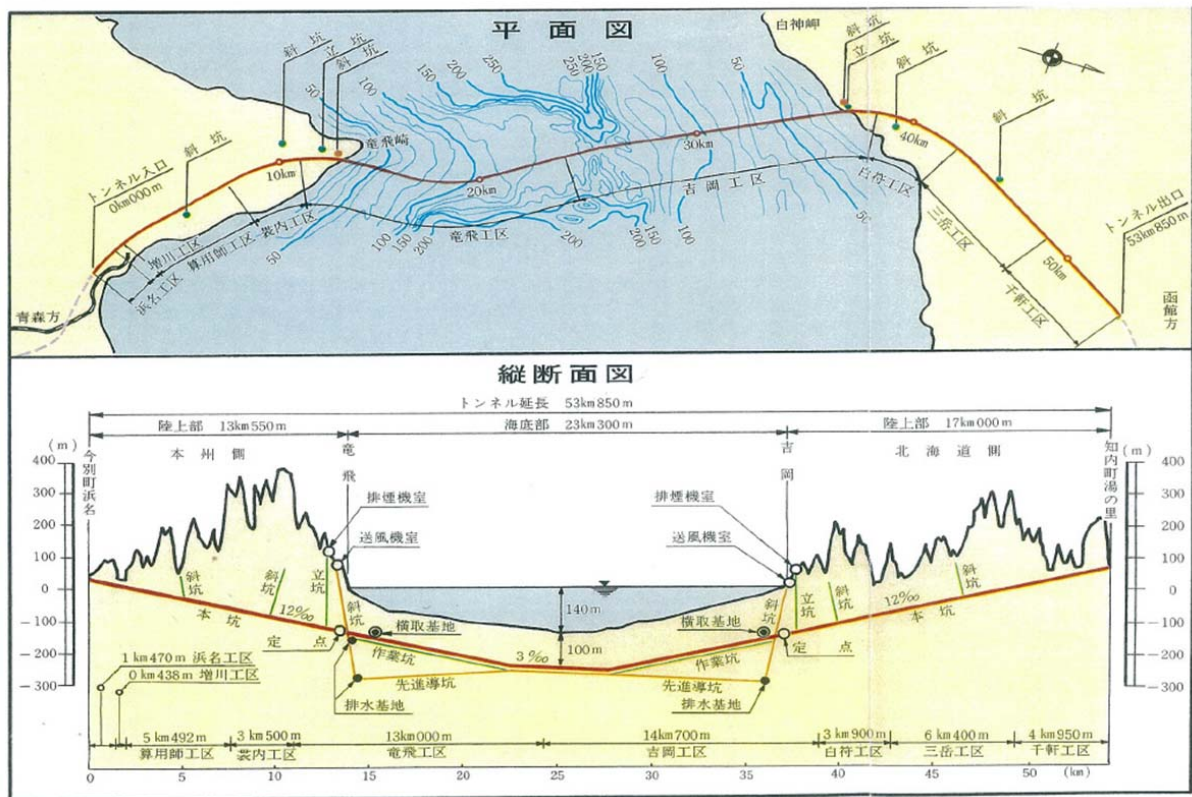


圖 39 青函隧道平面及縱斷面圖

青函隧道由 3 條隧道組成，共耗資 6890 億日元。隧道海底段長 23.30 公里。最大水深 140 米，覆蓋層厚 100 米，採用超前導坑和平行導坑法施工，以便提前探明地質情況並作通風、排水和出渣之用。平行導坑與主隧道中心間距 30 公尺，兩者之間每隔 600 公尺橫向通道連接。陸上部分本州端長 13.55 公里，北海道端長 17 公里，各設 3 座斜井和 1 座豎井，由斜井底部開挖位於正洞與平行導坑下方居中的超前導坑。海底複雜的地質斷層和軟岩構造，曾出現多次嚴重滲水事故，其中一次僅排水就用 150 多天。為此，創造了防止隧道漏水等先進技術。

為確保列車的準時、高速、安全運行，在函館設控制中心（control center），對列車的運行實施監控，還在隧道內建有兩座救援車站（現稱：定點）和 8 個熱感應點，裝有火災探測器、自動噴水滅火裝置、地震早期探測系統、漏水探測器等設備。一旦發生危險，列車可迅速就近駛入避難車站，乘客可通過兩側能收容上千人的避難所或傾斜坑道脫離險境。

2. 使用之斷面形式（Type of Cross-Section）

青函隧道採用「單孔雙軌」斷面形式，主要係衡量隧道施工及完工後之營運因素。〔18〕

（1）隧道施工因素

- 「單孔雙軌」比「雙孔單軌」斷面形式，其開挖、襯砌混凝土、灌漿等數量，均較少。
- 若採「雙孔單軌」斷面形式，於海底灌漿時，每一個隧道均需小心施工。「單孔雙軌」斷面略大，施工安全度及效率卻較佳。
- 全斷面開挖不適用於青函隧道地質狀況，且隧道斷面需考量容納新幹線列車。
- 「單孔雙軌」斷面形式，工程數量較少、滲水量亦少，整體建造經費預估少 10%。

（2）隧道完工後營運因素

- 列車駛入隧道，「單孔雙軌」斷面承受較少之空氣阻力。
- 依據實驗數據顯示，新幹線列車與貨運列車於「單孔雙軌」隧道內交會時，形成之風壓對貨運列車無巨大影響。
- 養護作業於「單孔雙軌」隧道進行時，鄰近軌道列車速度通常需限制。
- 採「單孔雙軌」斷面，營運時將帶來高溫，「雙孔單軌」則較有利，因此需配合使用強制通風。
- 採「單孔雙軌」斷面，遇列車事故之救援處理較容易。

■トンネル断面図 Cross Section

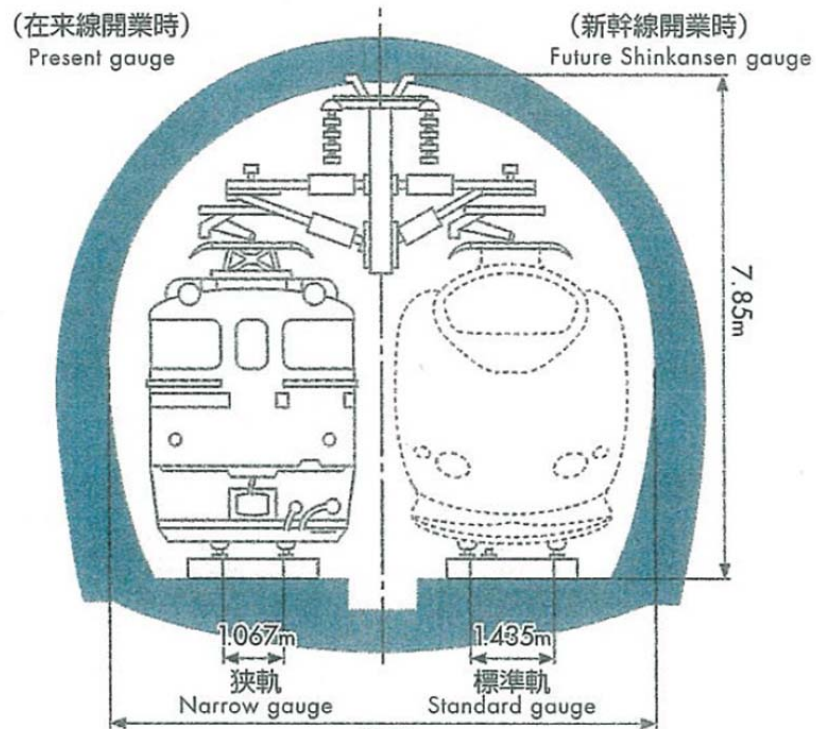


圖 40 青函隧道-断面形式

3 線 軌 道 構 造

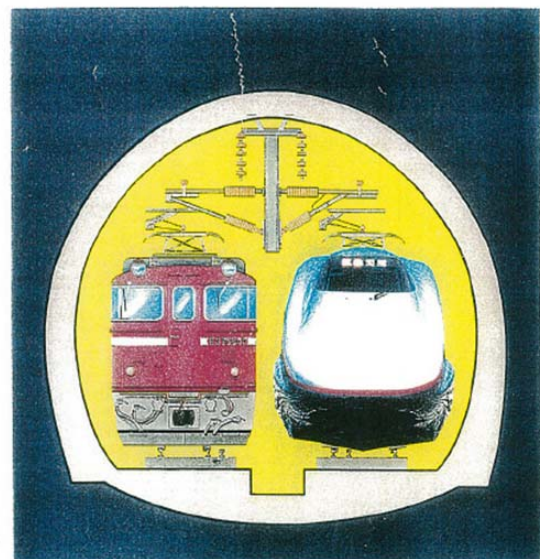
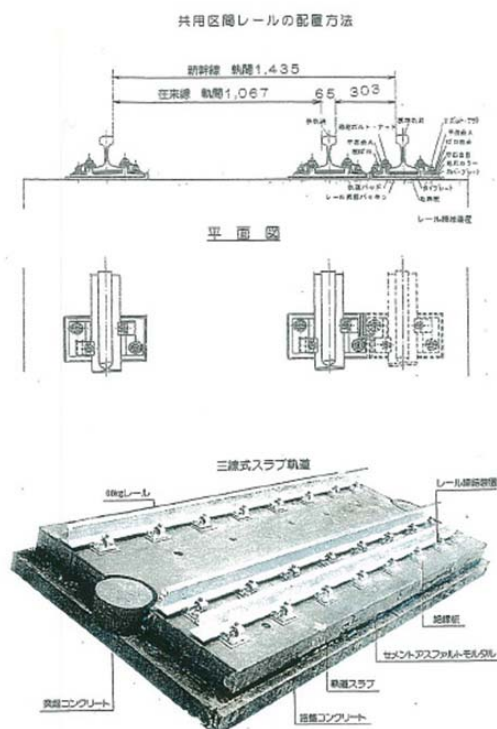


圖 41 青函隧道三軌結構

3. 海底隧道施工系統（Undersea Construction System）

因應青函隧道海底施工，除主隧道（main tunnel）外，另配合挖掘先進隧道（Pilot tunnel）及服務隧道（service tunnel）各一條（詳圖 42）。

- (1) 先進導坑先行於主隧道及服務隧道挖掘，從斜坑底部向海底中心約百分之 3 坡度進行鑽掘，並連接服務隧道，服務隧道則與主隧道中心線間距約 30 公尺。主隧道營運後，先進導坑隧道將擔任排水及通風之角色。
- (2) 服務導坑沿著主隧道平行挖掘，除肩負縮短總工期之任務，並以約 600 公尺間距之聯通道（connecting gallery）與主隧道相互聯接。主隧道營運後，服務隧道將使用於排水、通風及養護作業。

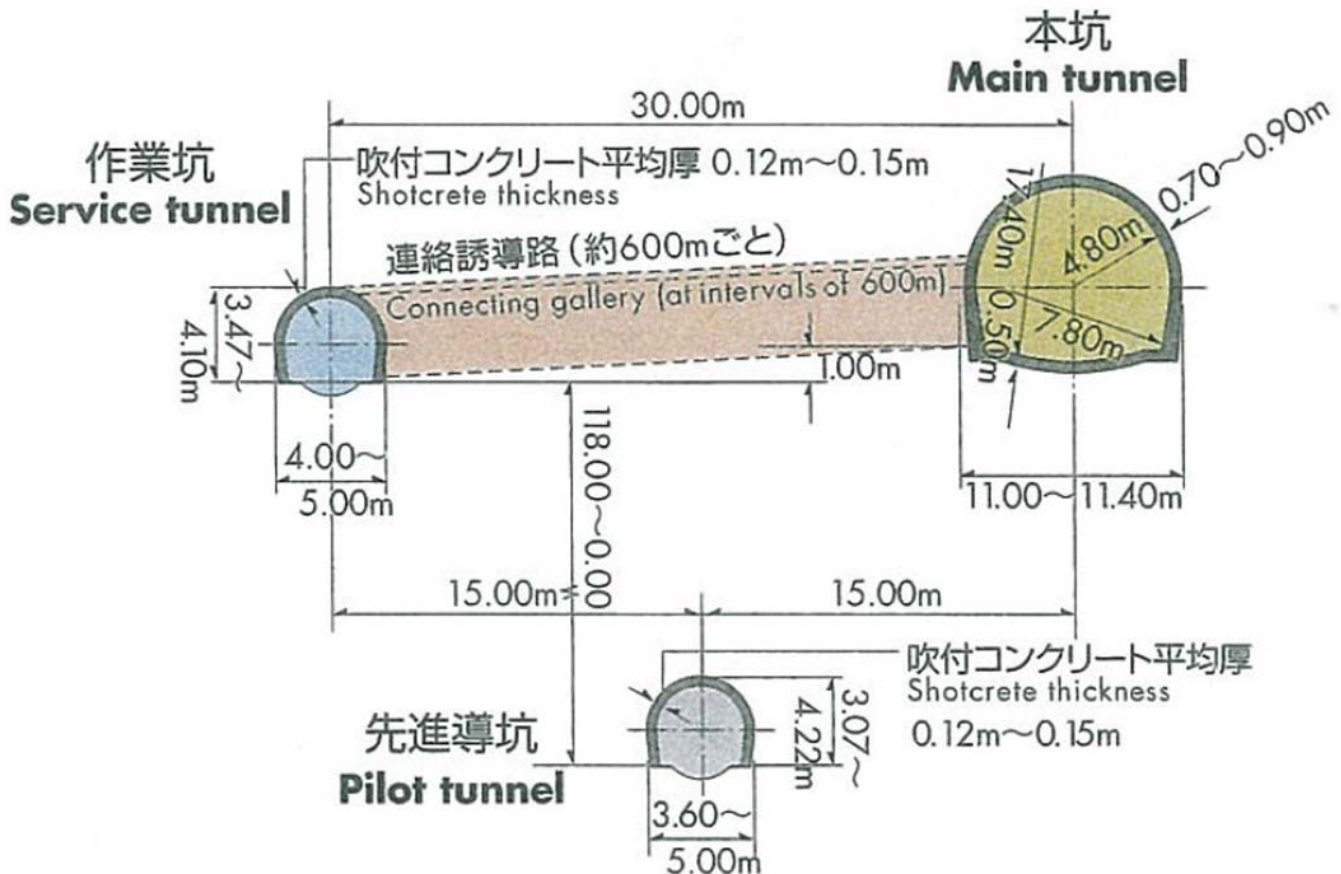


圖 42 主隧道等相對位置圖

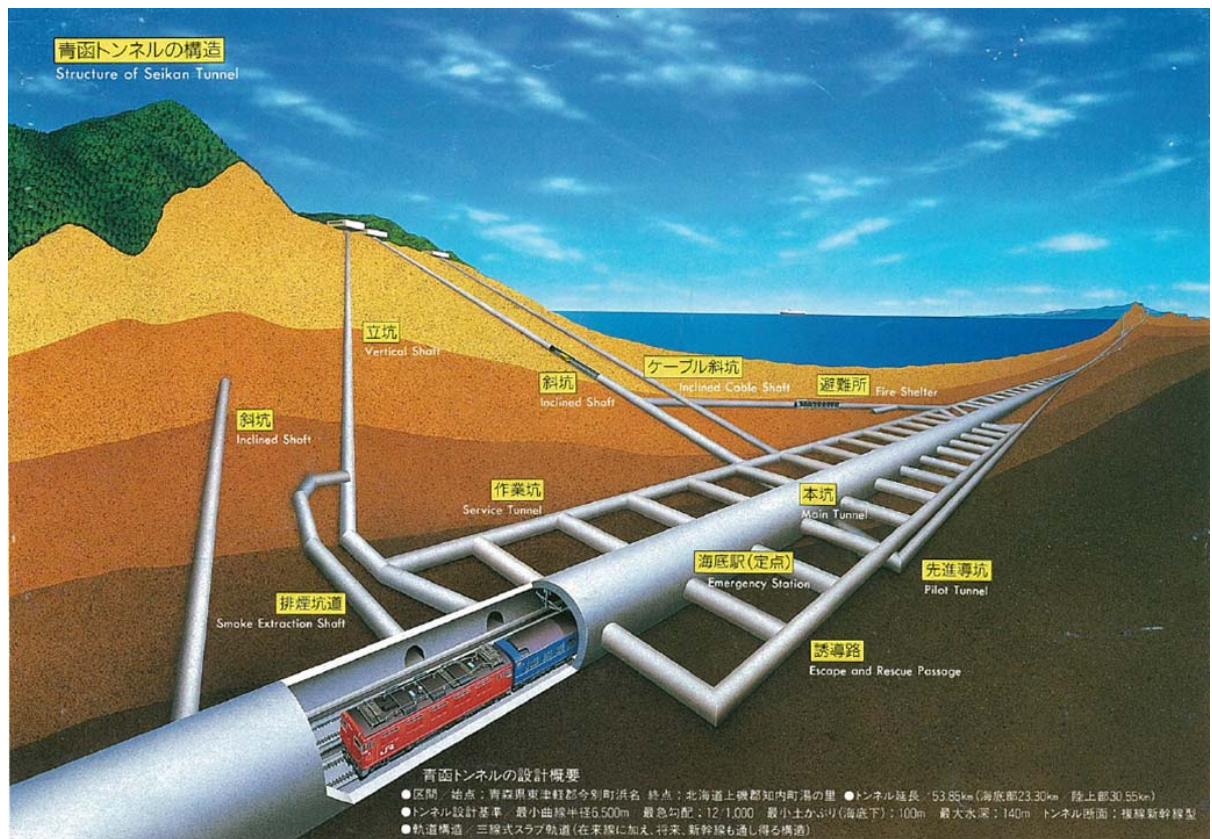


圖 43 青函隧道海底施工系統

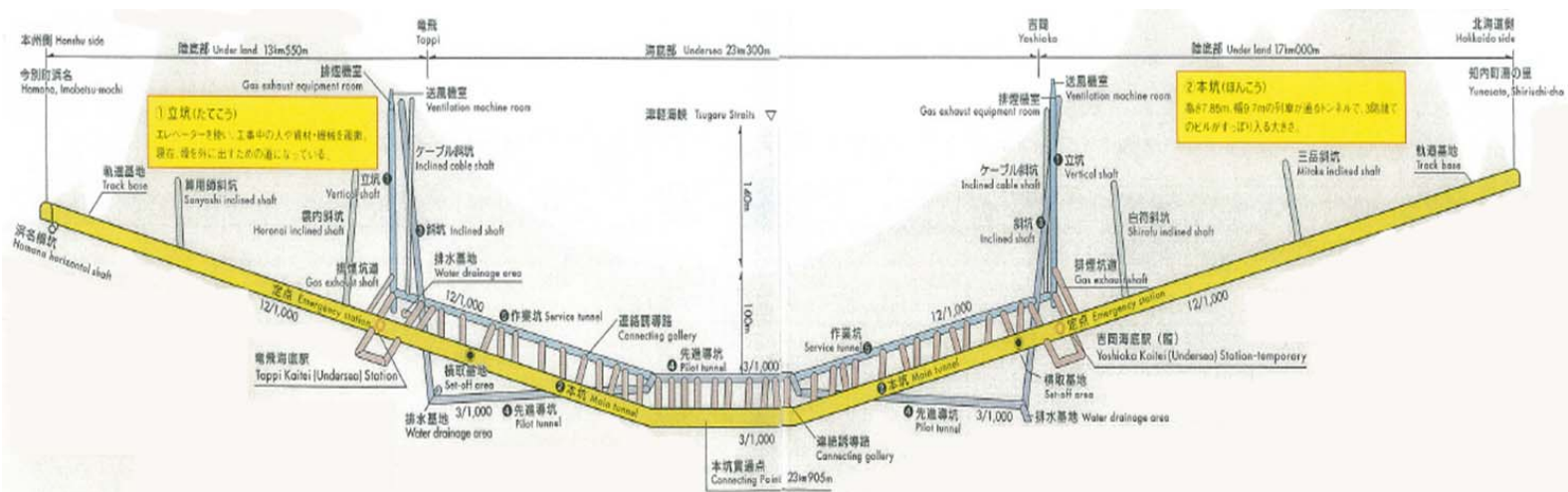


圖 44 青函隧道施工系統断面

4. 排水設施 (Drainage Facilities)

滲入青函隧道之水，速率約為每分鐘 40 公噸，因為青函隧道係由兩側入口斜向海底，使用於山岳隧道之自然重力式排水法，不能採用。最後，採用永遠強制排水法 (Permanent forced-pump drainage method)。

青函隧道於本州側 (Honshu side) 之抽水站 (P1 及 P2)，設置於先進隧道及服務隧道，並與斜坑 (inclined shaft) 連接。為何規劃二抽水站，主要原因為考量本州側之地面滲流水 (Seepage water) 非常高所致，抽水站 P1 設置於服務隧道係考量經濟及臨時排水，此二抽水站增加之設施經費，可由青函隧道節省之電費充分支出。青函隧道滲流水將流入先進隧道及服務隧道排水系統，引導至各抽水站後，再以抽水泵經由斜坑強力排出坑外 (圖 45)。

北海道側 (Hokkaido side) 之 P3 抽水站設置於先進隧道，倘若位於本州側服務隧道之 P1 抽水站毀損，亦能有充分能量將全部流至 P3 抽水站之滲流排出。此外，為避免機具長時間電力故障，各抽水站均有備用電力機組，緊急發電機並置於斜坑入口處，以備緊急使用 (圖 46)。

5. 通風設施 (Ventilation Facilities)

青函隧道是一條非常長的鐵路隧道，除充分風率 (Wind rate) 無法由自然通風取得，也有下列的問題：

- (1) 列車行駛將增加隧道內溫度。
- (2) 養護車輛產生有毒氣體，將殘留隧道內。
- (3) 濕度增加，對於機具及絕緣有負面影響。

為解決上述問題，決定採用縱向強制通風系統。空氣由本州及北海道兩側斜坑之空氣吸扇 (air-intake fan) 吸入，經由先進隧道送入主隧道，廢氣由主隧道兩端排出。經計算結果顯示，如果主隧道之風率能穩定維持於 1 公尺/秒 (m/s)，列車產生之熱度將不形成一項重大問題，即使隧道內列車大幅使用。廢氣需全力避免進入服務隧道，因為遇有列車火災事故時，該隧道將成為逃生及救援路徑 (圖 47)。

據研究資料顯示：青函隧道平日進行換氣作業時，送風機之空氣量為 $64 \text{ m}^3/\text{s}$ ；緊急狀況時，則提升至 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ 。排煙機平日不予啟動，若有緊急狀況，排氣量為 $10,000 \text{ m}^3/\text{min}$ ($166.7 \text{ m}^3/\text{s}$)，約 2 倍空氣量。

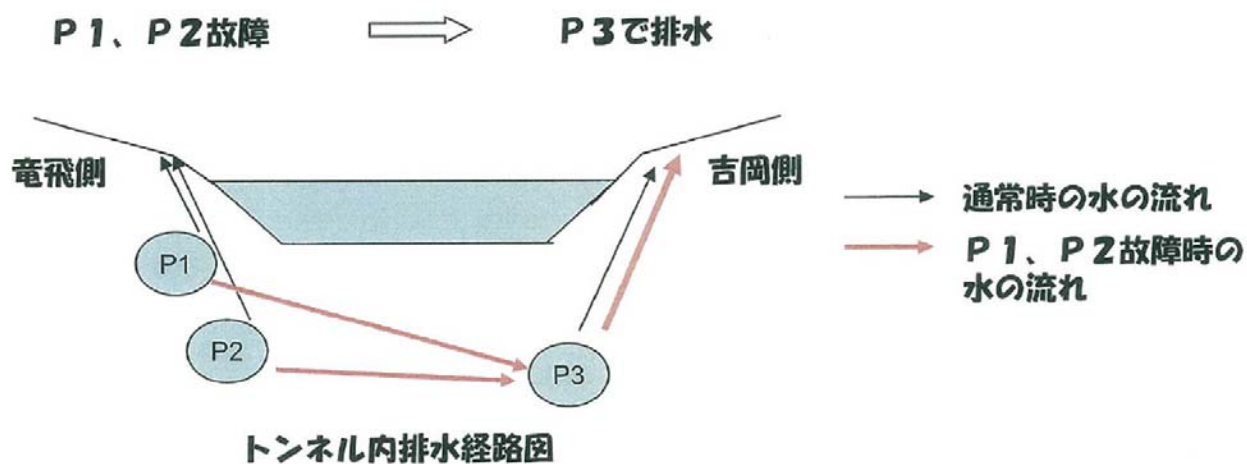


圖 45 排水路徑圖

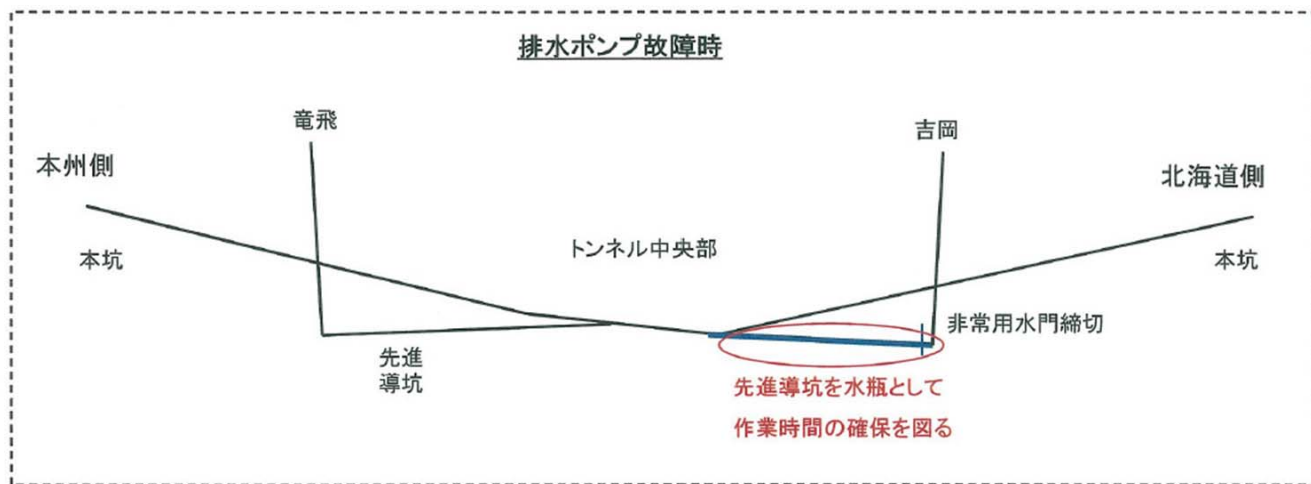


圖 46 排水故障處理圖

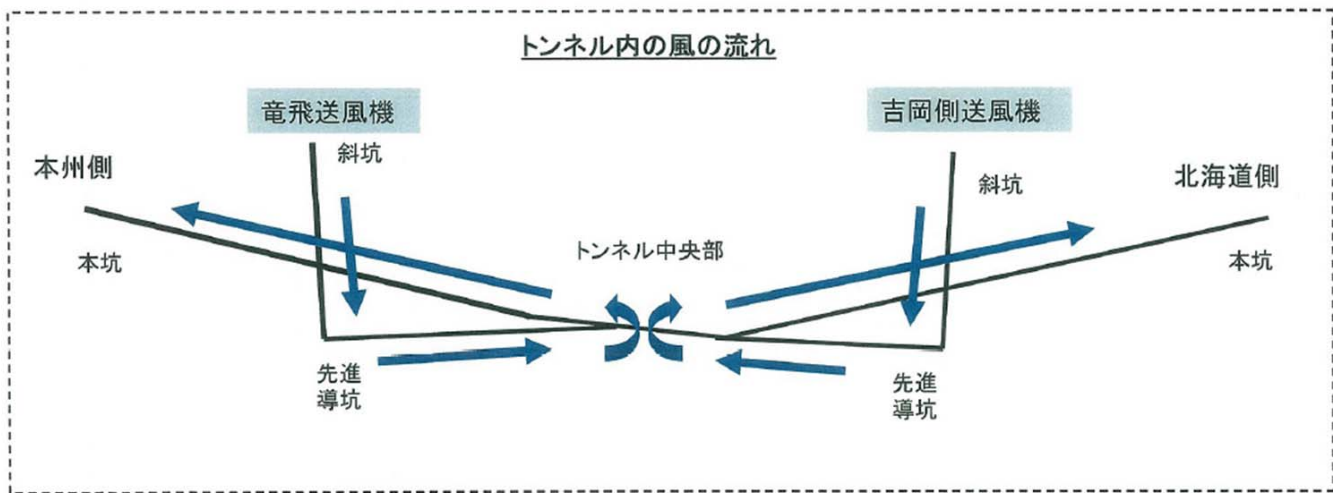


圖 47 通風方式

6. 火災防制設施（Facilities for Fire Prevention）

青函隧道長達 53.85 公里，如果火災發生時，列車極有可能無法駛達隧道之另一盡頭，而需停駛於隧道內之緊急車站（Emergency station），該車站需設置旅客必須之逃生及防火設施。

童飛緊急車站（Tappi Kaitei Station）及吉岡緊急車站（Yoshioka Kaitei Station）設置於本州及北海道兩側之海底斜坑，二個緊急車站相距 23.04 公里，將青函隧道分為三部分。

如圖 48 呈現吉岡緊急車站（Yoshioka Kaitei Station）逃生及救援路徑。一般而言，青函隧道之緊急車站需於主隧道兩側與服務隧道間設置相聯之逃生救援通道（Escape and rescue passage），通道間距為 40 公尺。主隧道部分有提供月台，以協助旅客由失火列車下車，另設有防火使用之噴水設備。此外，每一個緊急車站及逃生救援通道，均設有一套廣播及通信系統（communication and announcing system），可引導旅客至安全地點；另有專業電視攝影機（ITV, industrial television）及監視器，以掌控乘客逃生之實際情形。

為協助乘客自失火列車逃生，絕對須將濃煙抽離失火區域，由位於緊急車站豎井（vertical shaft）附近之排煙扇（exhaust fan）負責處理。同時，通風使用之空氣吸扇（air-intake fan）亦將持續運轉。經由斜坑處風閘（wind gate）之開啟，空氣由斜坑直接輸入緊急車站。

空氣輸入路徑需確認與乘客逃生方向相反，如此旅客不會遭濃煙威脅與壓迫。另於逃生救援通道（Escape and rescue passage）路徑及斜坑處，設置有一等待區（waiting area）足以容納列車逃生旅客，該區並配合設置醫療救

護站（medical relief station），俾利照顧受傷乘客。

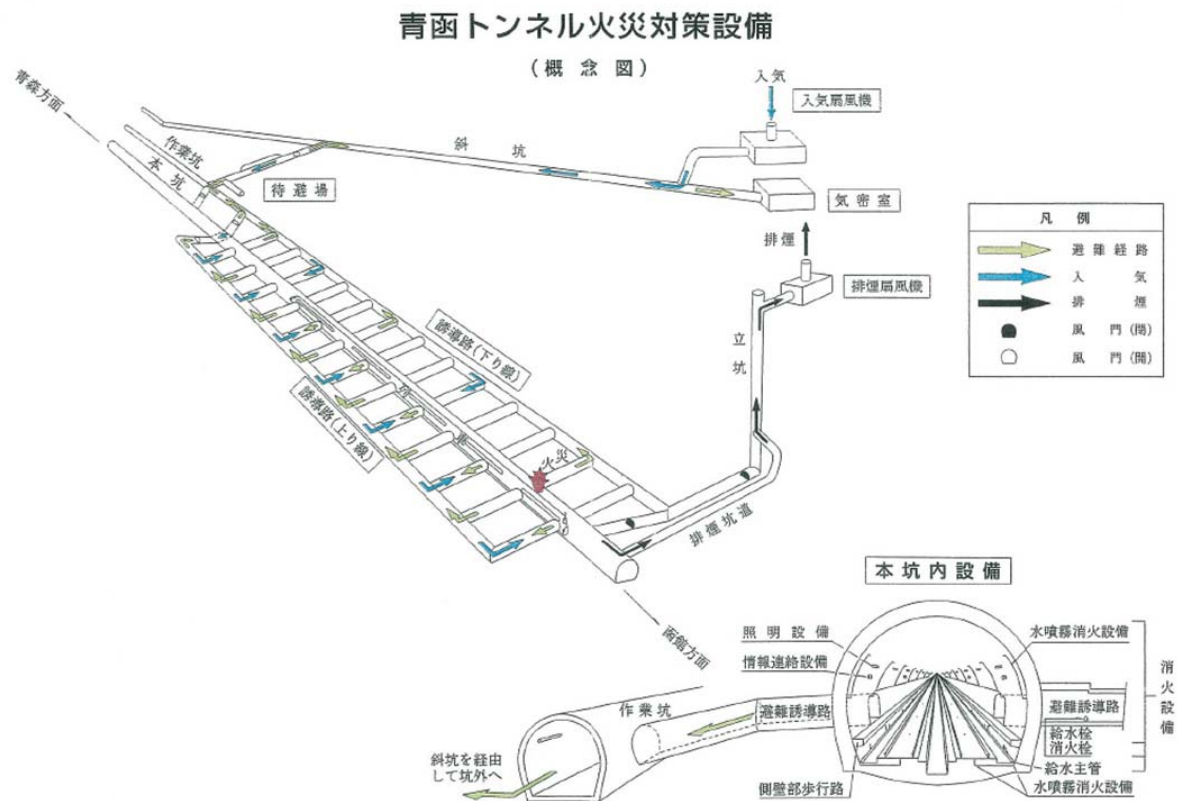


圖 48 火災防制對策及主隧道設備

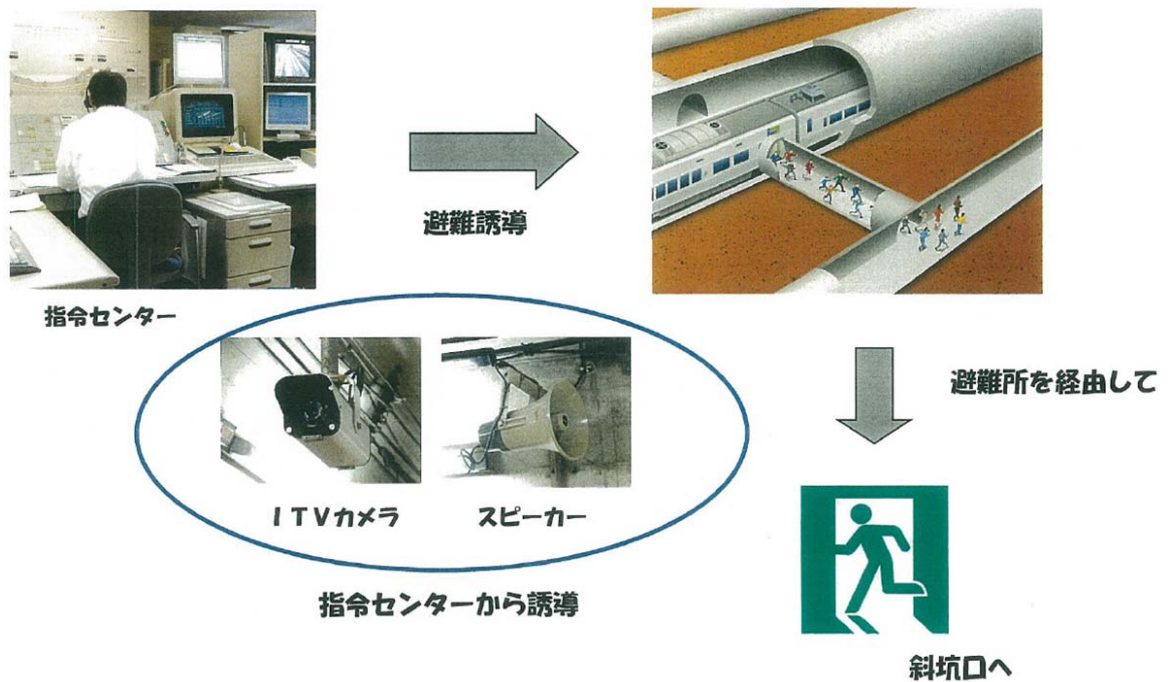


圖 49 避難誘導方法

任何列車火災盡可能在隧道內被偵測到，是極為重要地。這決定性因素不僅可檢視火勢之漫延，也確保了列車持續行駛及旅客成功的逃生。基於此項原因，為早期偵測列車火災，青函隧道於進出口及內外處，均裝設有火災紅外線（infrared rays）熱度偵測機（thermal fire alarm），可偵測到列車內外溫度。然而，對於列車煙霧卻不見得有效。



照片 11 主隧道



照片 12 服務隧道



照片 13 橫向通道



照片 14 斜坑



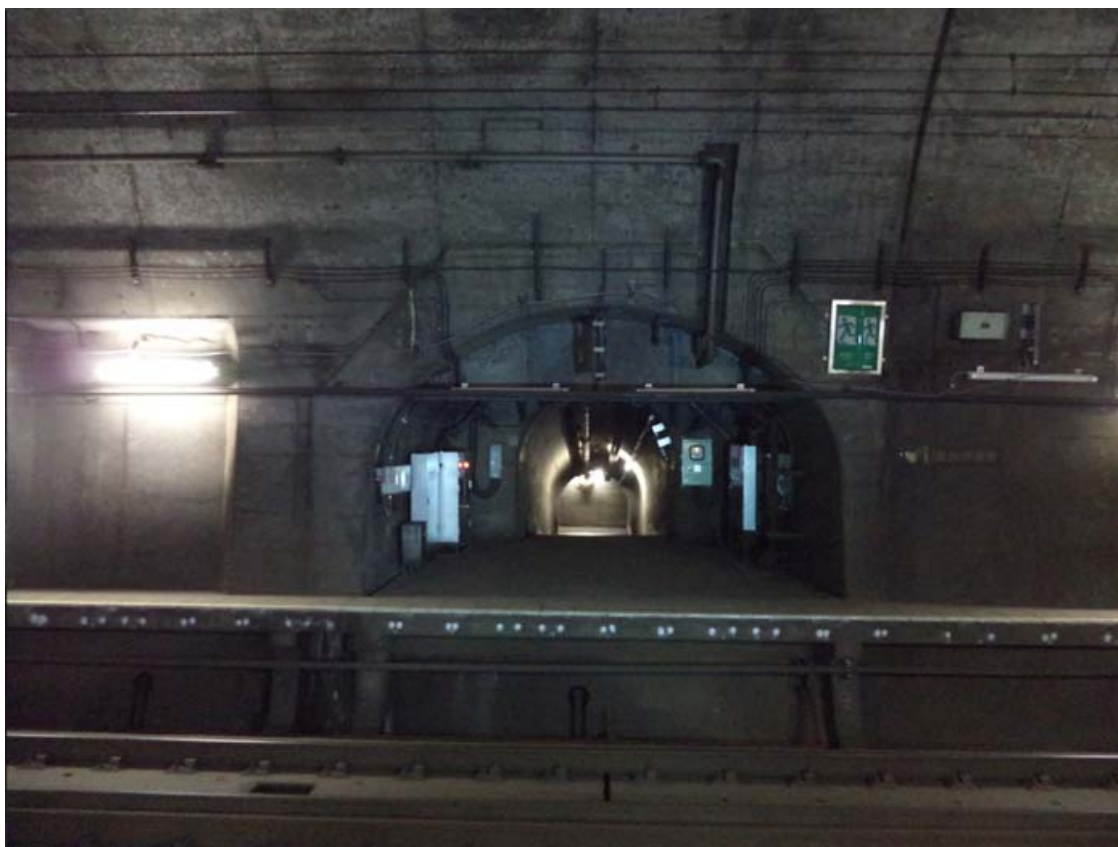
照片 15 避難所



照片 16 横取基地通道



照片 17 横取基地



照片 18 緊急車站聯絡通道

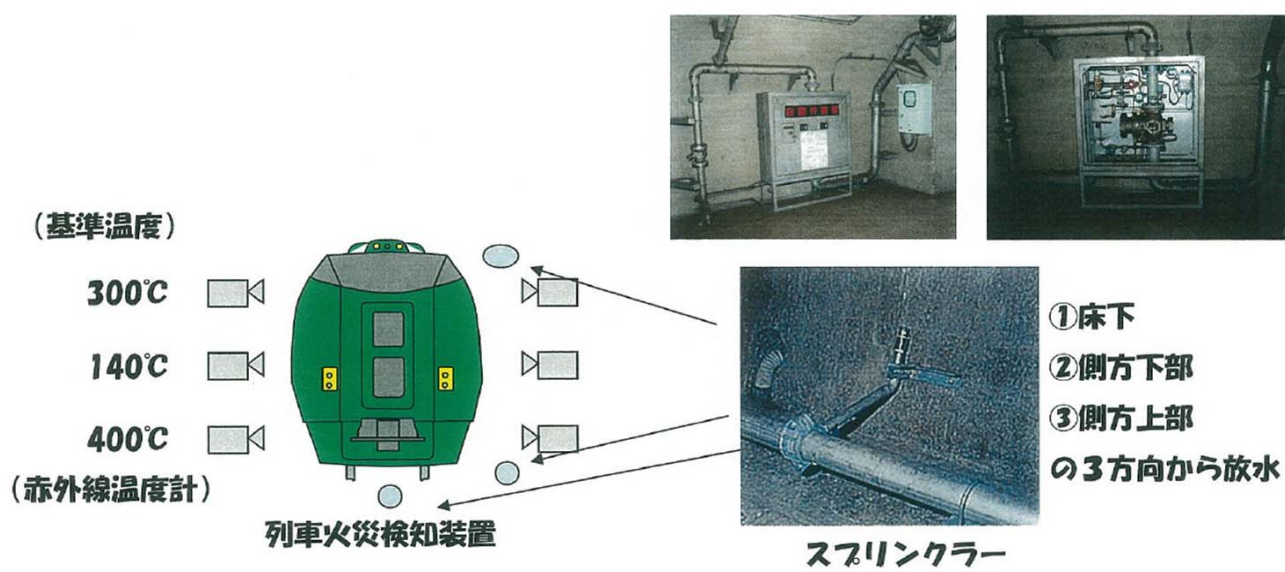


圖 50 列車紅外線檢知裝置 (1/3)

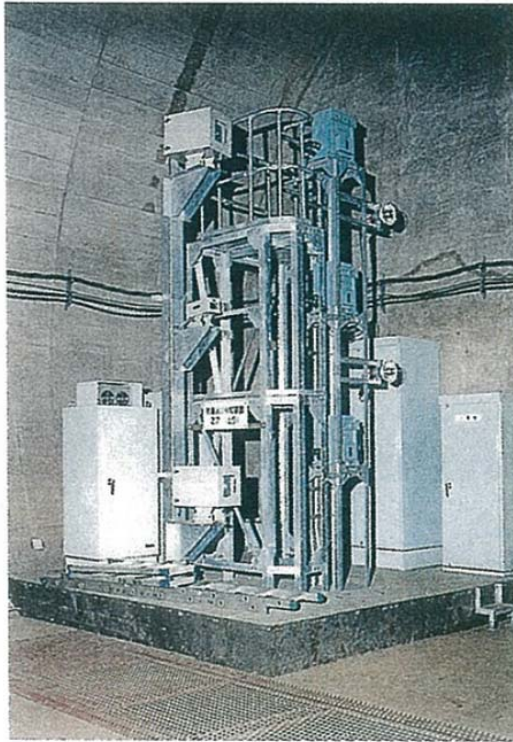


圖 51 列車紅外線檢知裝置 (2/3)



照片 19 列車紅外線檢知裝置 (3/3)

7. 地震防災設施

有鑑於日本地震頻繁，為確保隧道列車運輸安全，青函隧道特別針對地震設置防災相關設施，這些設施有地震儀（NEWS 改良型）、早期地震預警檢知系統（UrEDAS）、傾斜儀及湧水檢知系統等四項（圖 52）。

另一方面，由於青函隧道屬海底長隧道，在發生地震災害時，為確保旅客生命安全，在到達避難地點（定點或洞口附近）前，列車必需持續移動。就遭遇地震時列車之控制方法，不需立即切斷電源，而是使用 ATC 0.2E（絕對停止號誌）使列車停止。對於列車是否再行駛，則需依監視系統之判斷及確認安全後，方能使列車運行。

（1）地震儀（NEWS 改良型, New Earthquake Warning System Improved Type）

NEWS 改良型地震儀為地震儀、端末送信裝置、中央顯示裝置等三部分所組成。青函隧道內洞口及海底斷層處附近，共設置六處。當偵測到地震振動加速度 40gal 以上時（共有 30gal, 80gal, 120gal 三階段），地震資料將由地震儀端末送信裝置送至函館控制中心（control center）之中央顯示裝置，並送出 0.2E 號誌使列車停止行駛。

（2）早期地震預警檢知系統（UrEDAS）

UrEDAS 偵測地震之 P 波後，立即推估地震震度規模及震源距離，並判斷地震是否有傷害，透過端末送信裝置將上述資訊送至函館控制中心。青函隧道內，UrEDAS 共設置八處。

（3）傾斜儀

隧道覆土層是否歪斜，正反映岩盤狀況。因此，在青函隧道出水斷層（16K 附近）、火岩脈（21K 附近）、F1 斷層（30K 附近）、F10 斷層（33K 附近）等四處有設置差動式高感度傾斜儀，每一處均有三個斷面，計 12 個高感度傾斜儀，資訊係經由主隧道之 Dre amplifier 及服務隧道之 main amplifier 傳送。

（4）湧水檢知系統

地震儀及傾斜儀係設置於地震影響最顯著之位置，為求取更完整之資訊，青函隧道另以超音波方式設置湧水檢知設備。湧水增加，其實也正反映周邊岩盤之異常，因此青函隧道在隧道周邊地質劣化區、施工困難處及主隧道、服務隧道、先進導坑等位置，共建置 27 處湧水檢知設備，使用「堰型感知器」測越流水深，以「開水型感知器」測水深及流速，這些資料經由 A/D 變換器送信至中央顯示裝置。

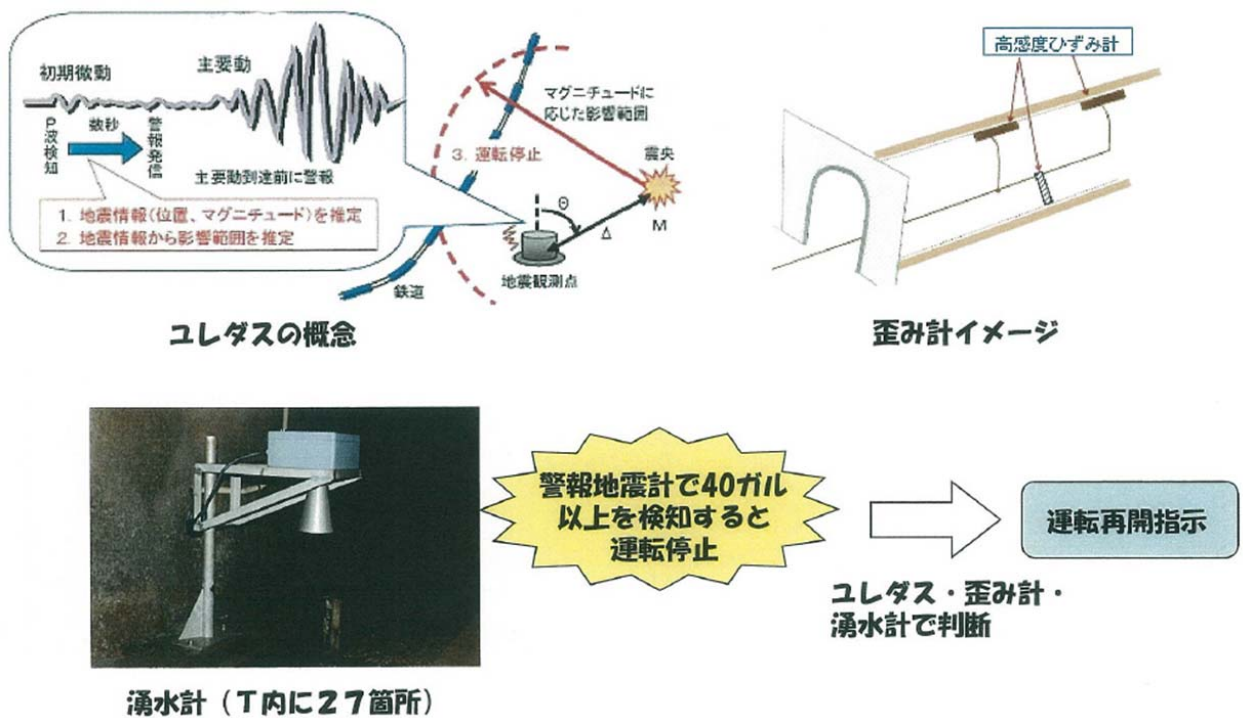


圖 52 地震防災設施

上述設施確保青函隧道主體之安全及列車穩定之運轉，然而青函隧道特有之濕氣、漏水及經年累月之劣化現象等，恐將發生設施機器不再適用之問題，或系統故障等情況。目前青函隧道之地震防災設施，每年均已委外執行檢點作業、維護管理及更換機器。為配合北海道新幹線之開通，現有之地震防災設施，視將重新整備及適時檢討。

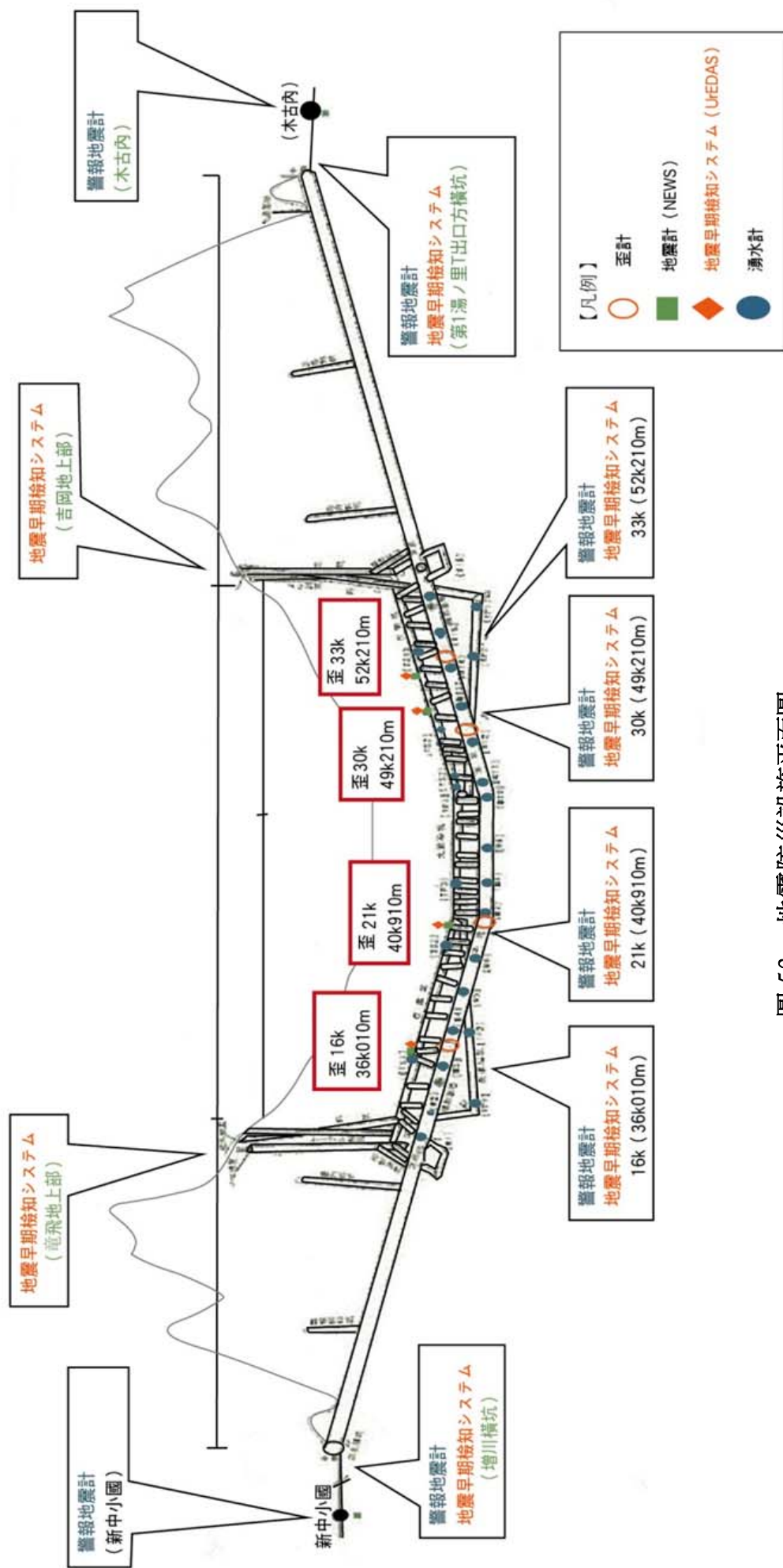


圖 53 地震防災設施平面圖



照片 20 隧道内地震儀



照片 21 隧道内地震検知



照片 22 高感度傾斜儀



照片 23 氣壓計及溫度濕



照片 24 湧入計



照片 25 湧入検知設備

8. 中央監控室（Control Center）

行駛於青函隧道之營運列車，係由位於函館及青森間之中央監控室（Control Center）統一管制。各列車所在位置及隧道內各項設備現況（含氣象、電力、號誌、空氣速率、火災、地震儀、傾斜儀、湧水、照明、電視監測器等），均可精準顯示於監控面版（panel）或 PC 螢幕，駕駛員（locomotive driver）並可於任何時間使用無線電與監控室調度員（diapacher）聯繫。

青函隧道內任何防災設備之現況訊息，均可自動傳輸至中央監控室。遇有緊急狀況，中央監控室調度員可手動控制滅火、排煙、燈具等相關設備，迅速因應。上述大量資訊，藉由光纖電纜（optical fiber cables）傳遞，快速有效，為先進之傳輸技術；若有光纖電纜失效（malfunction）狀況，中央監控室也有備用之微波（microwave）系統，可迅速操控。電力方面，擁有二套以上之備用系統。



照片 26 設置地點

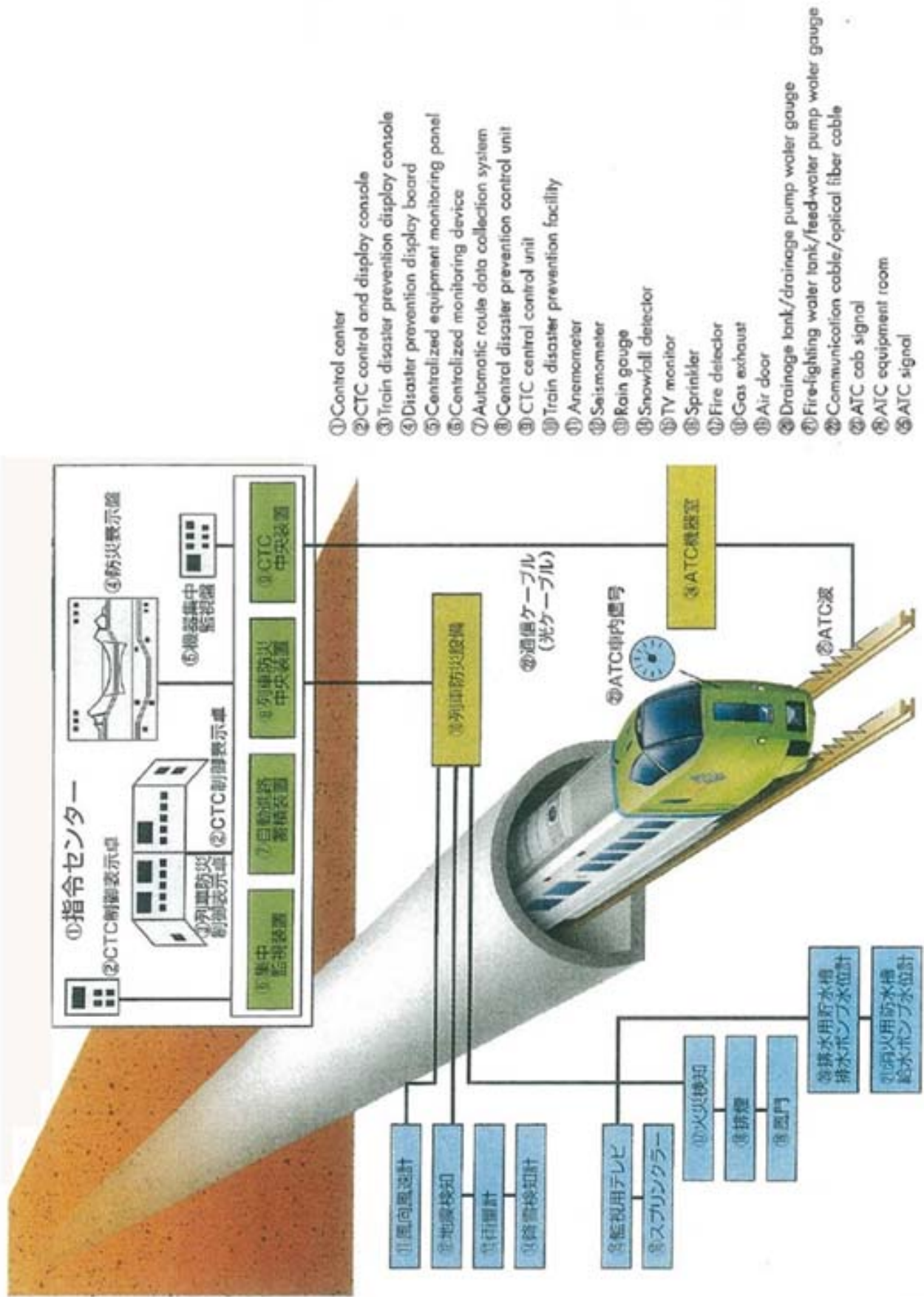
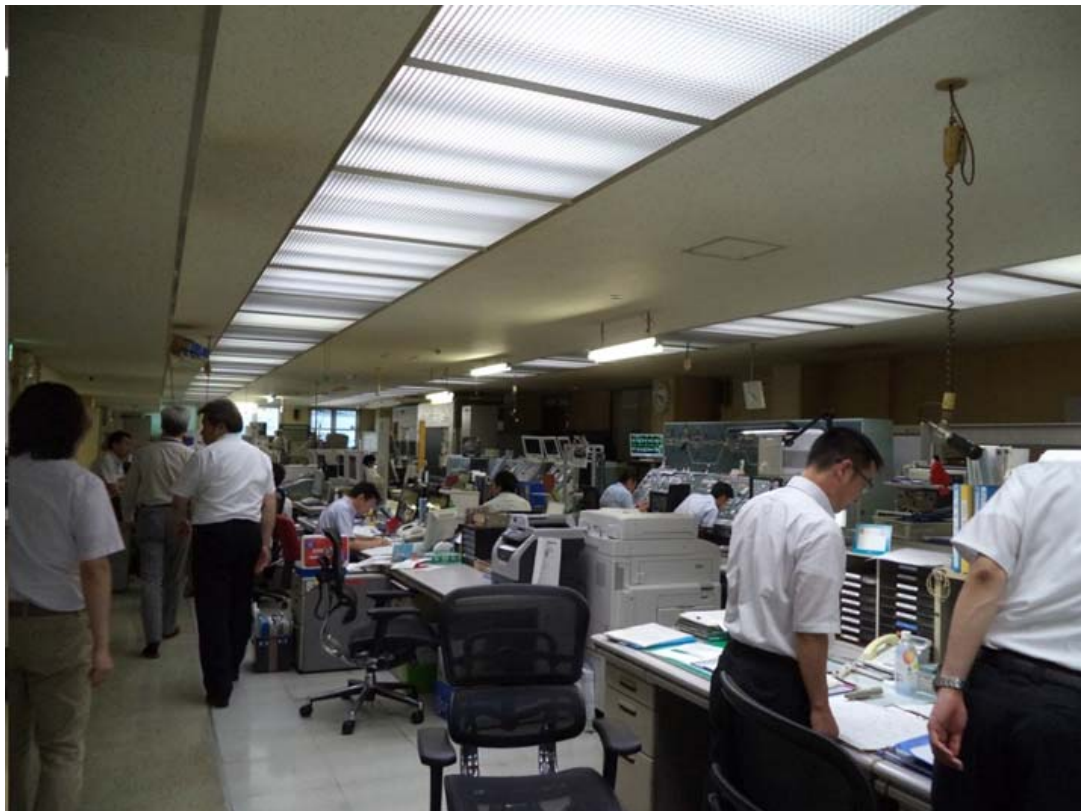
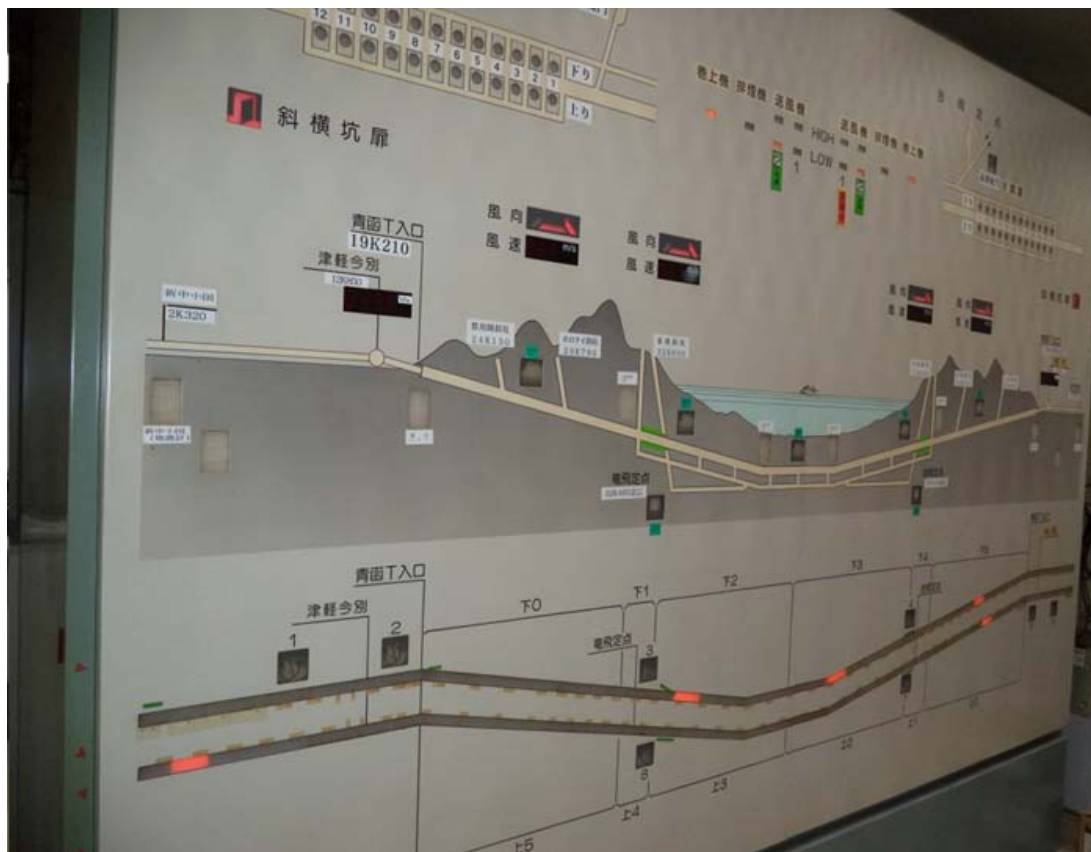


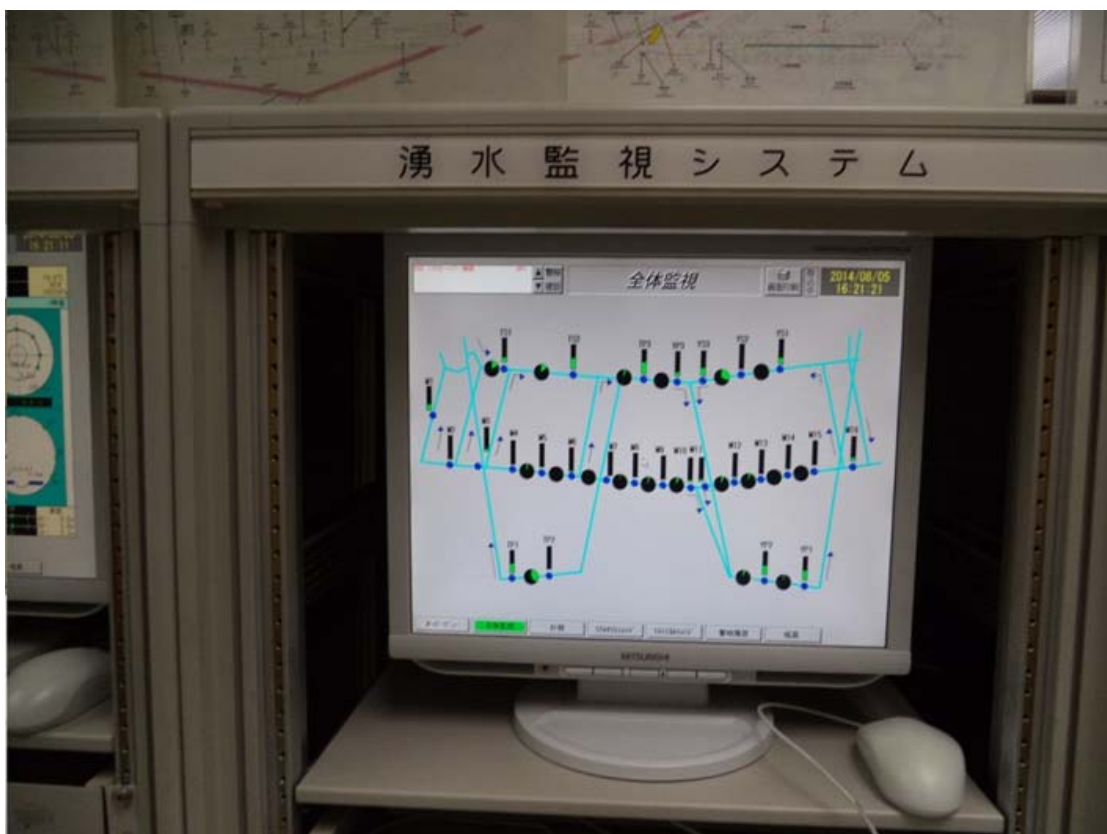
圖 54 監控中心監控項目



照片 27 監控中心辦公室



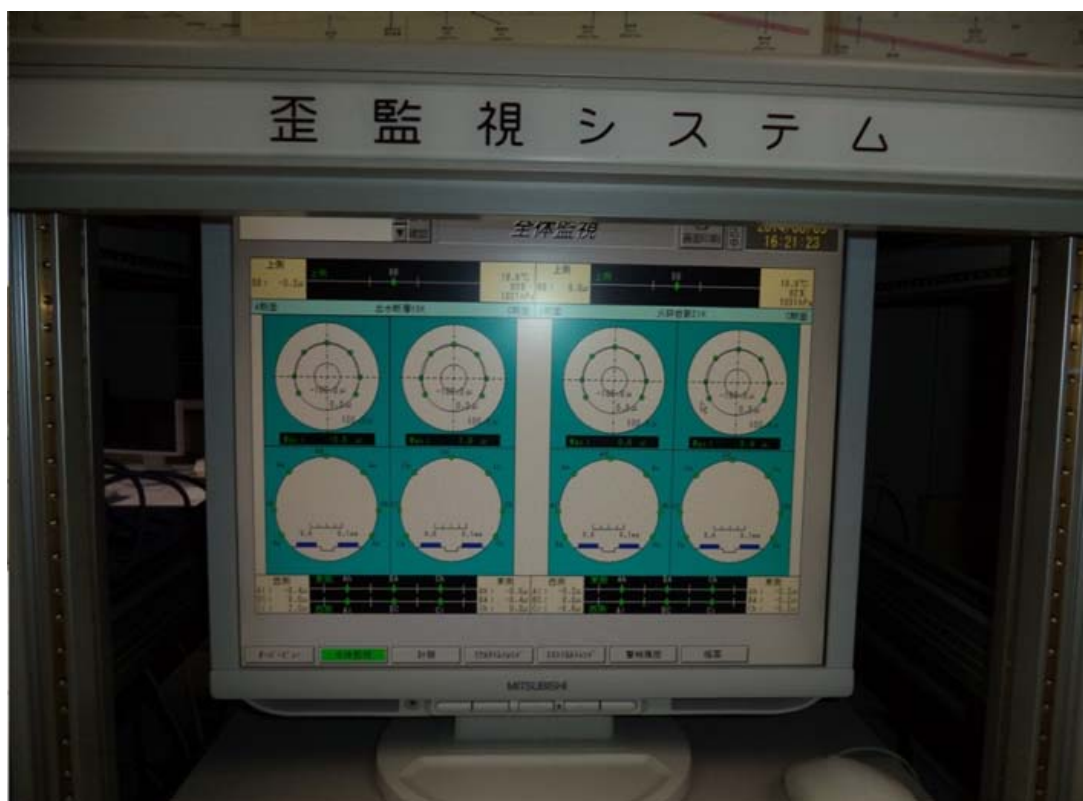
照片 28 監控大面版



照片 29 PC 湧水監控



照片 30 PC 地震監控



照片 31 PC 傾斜監控



照片 32 CTC



照片 33 電力监控系统



照片 34 新监控系统测试



照片 35 各部門機能管控



照片 36 各部門機能管控

（四）英法隧道（Channel Tunnel）

1. 英法隧道概述

英法隧道（Channel Tunnel，亦稱 Chunnel；法語 Le tunnel sous la Manche）是一座 50.45 公里長的海底鐵路隧道，位於英吉利海峽（English Channel）多佛爾水道（Strait of Dover）下（圖 55），連接英國的福克斯通(Folkestone)和法國加來海峽省的科凱勒（Calais，位於法國北部的加來附近）。英法隧道最低點有 75 公尺深，該隧道海底部分長度以 37.9 公里成為世界第一；而相形之下，比海底部分全長 23.30 公里的日本青函隧道（全長 53.85 公里，深度 240 公尺）更勝一籌。

英法海底隧道兼負高速列車歐洲之星（Eurostar）、汽車擺渡列車（Eurotunnel Shuttle，歐隧穿梭）及國際貨運列車之行駛。Eurotunnel Shuttle 屬汽車擺渡列車，是全世界最大鐵路車廂，負責在隧道兩端之末端站（Terminal）運送公路車輛。英法隧道兩頭分別與法國高速鐵路北線（LGV Nord）和 1 號高速鐵路者（High Speed 1）相聯接。〔19〕

興建跨越英吉利海峽海底隧道之構想，最早可追溯至 1802 年，但英國方面因嚴峻之國家安全形勢帶來的政治和輿論壓力，使建造海底隧道的努力落空。最後由歐洲隧道公司（Eurotunnel）於 1988 年動工，1994 年通車營運。隧道工程經費超出其預估費用達 80%，列車速度為 160 公里/小時，採用 1435mm 標準軌。

2. 建造主要內容

英法隧道工程，主要建造內容如後所述（圖 56）：

- （1）兩座單孔單軌隧道（Single tube with single-track）直徑 7.6 公尺，間距 30 公尺，全長 50.45 公里。
- （2）兩座主隧道（main tunnel）間，另設置服務隧道（service tunnel），直徑 4.8 公尺。
- （3）橫向通道（Cross-passage）直徑 3.3 公尺，間隔 375 公尺，連接服務隧道與主隧道。
- （4）兩座主隧道間，設直徑 2 公尺活塞管道（piston relief duct），間隔 250 公尺。
- （5）兩座聯結主隧道之海底橫渡線隧道（Undersea Cross-over Tunnel）。

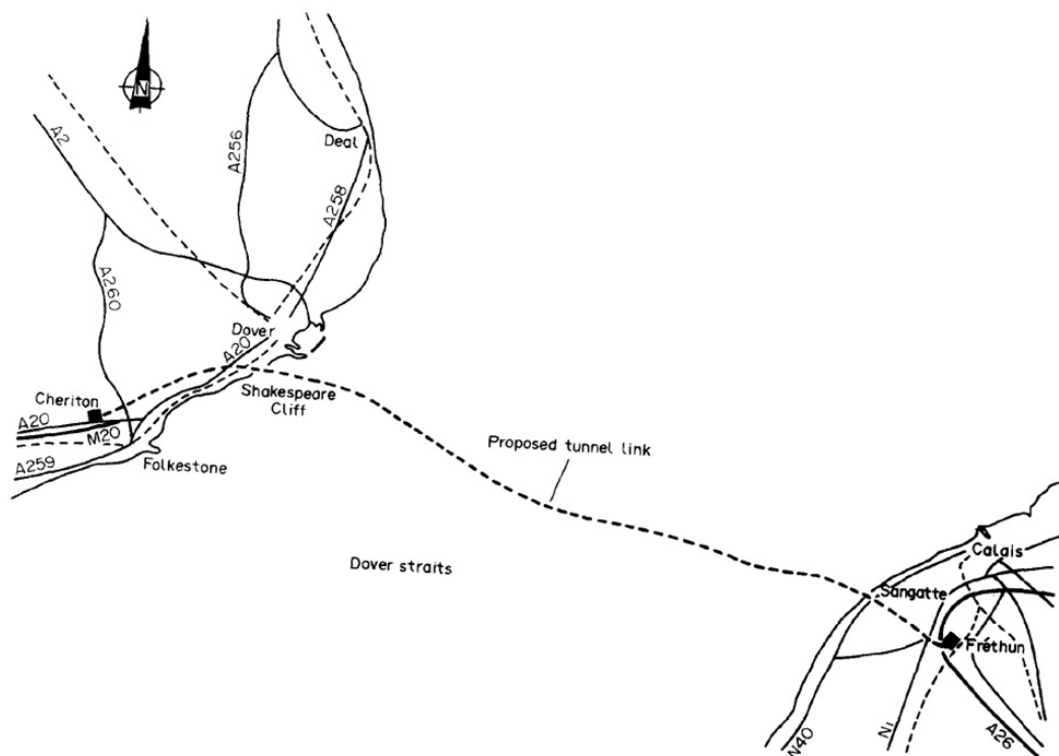
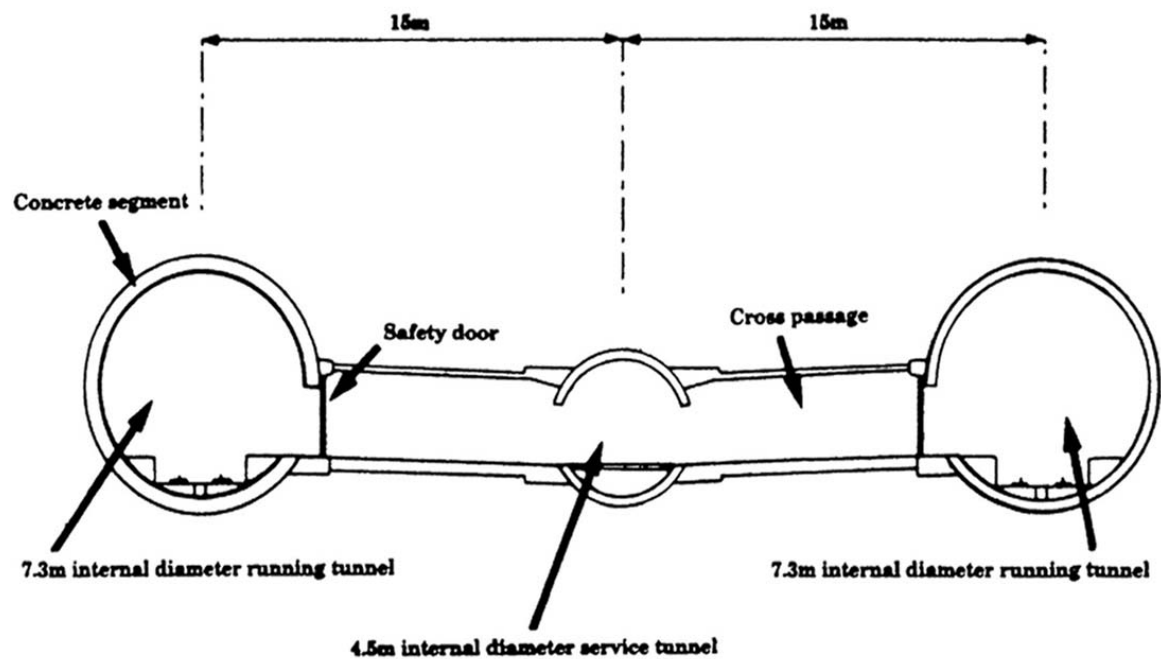


圖 55 英法隧道地理位置



Typical cross-section of the Channel tunnel system.

圖 56 英法隧道斷面型式

3. 排水設施 (Drainage Facilities)

英法隧道沿著施工路線進行鑽掘時，即審慎評估預期流入隧道之水量。本隧道最低點計 4 處，均設有排水坑 (drainage sump)，可將匯集水排出隧道外。排水坑除處理平常水量外，也因應緊急狀況如排水機故障、排水管爆裂、冷卻水管、提供消防水等。

4. 通風設施 (Ventilation Facilities)

通風要求部會很複雜，最重要是面臨緊急狀況時，新鮮空氣需須送至服務隧道 (Service Tunnel)，這是安全考量。此外，對於隧道及橫向通道內之所有工作人員，需提供絕對一個令人滿意之工作環境。

英法隧道之一般通風系統 (Normal ventilation system)，即是將新鮮空氣送入服務隧道，並將廢氣排出鐵路隧道外。緊急通風系統 (Emergency ventilation system) 或是煙霧排除等，就屬於鐵路隧道之緊急狀況。

(1) 一般通風系統 (Normal ventilation system)

每座主隧道 50% 之通風，可由英國及法國兩邊海岸地區供應。在法國側，一座通風機房 (Ventilation plant room) 已建於聯接服務隧道 (Service Tunnel) 之直徑 3.6 公尺直井 (Shaft) 上；在英國另一側，通風廠房 (Ventilation plant building) 則位於莎士比亞懸崖 (Shakespeare Cliff) 斜坑入口，該廠房連接服務隧道。

英法隧道空氣，由隧道兩側向下流往服務隧道及各橫向通路，速率為 $88\text{m}^3/\text{s}$ ，足以提供隧道 20,000 人需求。設氣閘 (dampers) 控制氣流流入隧道，也配合橫向通路門 (gate) 取得平均之空氣流量。一扇氣密門 (Airtight door) 則位於服務隧道之中間點。

(2) 緊急通風系統 (Emergency ventilation system system)

遇有緊急狀況時，英法兩邊海岸之通風井及設備，均可直接供給兩座隧道新鮮空氣，以控制火災煙霧。在法國側，空氣量為 $260\text{m}^3/\text{s}$ ；英國另一側，則為 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。另一方面，也可將風扇反向抽離火災煙霧 (Smoke and fumes)。

5. 火災防制設施 (Facilities for Fire Prevention)

(1) 服務隧道 (Service Tunnel)

服務隧道 (Service Tunnel) 施工期間期，用作導洞，在主隧道之前推進 (至少 1 公里) 以探查前方地質狀況。英國側入口位於莎士比亞懸崖，法國側入口則是位於桑加特的一座豎井。通車營運後，主要使用於前往橫向通道 (Cross-passage) 及放置機具設備，並提供新鮮空氣和緊急疏散。

(2) 橫向通道 (Cross-passage)

橫向通道直徑 3.3 公尺，間隔 375 公尺，主要功能為聯接服務隧道與主隧道。在 1996 年 11 月 18 日發生之嚴酷火災事故中，即以突顯它的重要性。很幸運地，旅客從失火隧道逃往從其中一條橫向通道，呼吸到了新鮮空氣。其實，原先橫向通道規劃為 250 公尺設置一條，後因經費考量，改為 375 公尺。

(3) 活塞管道 (piston relief duct)

高速行駛列車之活塞效應，帶來的壓力變化可能影響旅客舒適度、通風系統、隧道內門、風扇及列車結構，並拖慢列車速度。直徑 2 公尺之活塞管道 (piston relief ducts)，間隔 250 公尺，可用於減輕此活塞效應。

(4) 特殊到達側線 (Special arrival siding)

列車發生火災，一般處理是將旅客迅速從失火車廂轉移至鄰近車廂，然後將前後車廂防火門 (fire resistant door) 關閉，隔離失火車廂。在到達末端站前，列車不能停，駛入特殊設計之側線，此處可提供旅客逃生及備用消防設備。此到達側線之運作，不會影響其他防災系統之執行。

(5) 其他

a. 具冷卻設備

英法海底隧道是第一條擁有特殊冷卻設備的鐵路隧道。鐵路列車牽引裝置及拖行均會產生熱量，而隧道設計之極限為 30 攝氏度，並使用英法兩側的冷凝裝置輸送隧道所需之循環冷卻水。

b. 嚴禁隧道危險貨物

為了減少列車火災事故之發生，歐洲隧道公司 (Eurotunnel) 嚴禁隧道搭載危險貨物 (Hazardous commodities)。這些貨物係指易燃及有毒等物品。

c. 設立緊急救援隊 (Emergency reaction force)

火災事故之發生時，首先通知國際火災中心 (National Fire Service)。然而，歐洲隧道公司 (Eurotunnel) 有駐紮一支緊急救援隊 (Emergency reaction force)，可迅速到達任何發生事故之地點。

而位於服務隧道之運輸系統 (STTS) 可使服務車輛快速抵達隧道內所有區域。服務車輛係使用橡膠輪胎和埋線導引系統，主要用於養護，也用於滅火和緊急情況使用。每部 STTS 車輛都有一個儲備箱 (Pod)，裝載救援緊急設備，箱內設備可依救援任務不同需求，更換所需設備。

6. 英法隧道 1996 年火災事故 (Event of fire)

(1) 事故經過

這場火災發生於 1996 年 11 月 18 日，事故起因仍不明確，可能是載運重型貨物之列車進入隧道前不慎失火，確知非因任何機件或是歐洲隧道公司 (Eurotunnel) 所屬設備或車輛故障之原因。

- a. 失火列車屬 HGV 短程貨物火車 (freight shuttle)，該列車離開載貨月臺 (loading platform) 於 21 時 42 分，駛入隧道 21 時 48 分。
- b. 21 時 49 分，英國火災設備管理中心 (Fire Equipment Management Centre) 收到通知：隧道內一個煙霧警報器啟動，另有二個警報器也啟動，紀錄時間為 21 時 50 分。
- c. 21 時 54 分，緊接更多警報器啟動，一個火焰警報器也啟動。鐵路管制中心指示全部列車減低速度，活塞管道 (piston relief ducts) 節風門 (damper) 關閉，以避免濃煙擴散至另一個隧道。
- d. 21 時 59 分，列車失去動力，列車司機通知鐵路管制中心 (Rail Control Centre)。
- e. 22 時 04 分，英法第一波緊急救援隊 (Response team)，進入隧道救援。
- f. 22 時 12 分，鐵路管制中心啟動緊急通風系統。
- g. 22 時 21 分，為驅散隧道濃煙及有利列車逃生，鐵路管制中心開啟鄰近事故地點之橫向通道 (Cross-passage) 門。
- h. 22 時 25 分，列車全部旅客避難至服務隧道。
- i. 22 時 42 分，旅客移到停靠在另外隧道之短程列車 (tourists Shuttle train)。
- j. 22 時 56 分，法國第二波緊急救援隊 (response team) 進入事故地點；23 時 55 分，會合英法緊急救援隊。
- k. 國際消防隊 (National Fire team) 於午夜抵達事故地點，並開始滅火。至 18 日 5 時 00 分，火勢宣布被撲滅。

(2) 火災損失及破壞

列車停車後，火勢有漫延至其他列車車廂。據估計，火源中心溫度高達 1,000 度以上。隧道嚴重破壞長度超過 46 公尺，遭受破壞部分超過 280 公尺，影響隧道總長約 500 公尺。大量的鋼筋混凝土襯砌被毀損，約 60 天完成修復工作；電力及號誌等設備，約有 4,000 公尺遭受破壞，修復時間超過一個月以上。

(3) 火災教訓

- a.隧道內檢視濃煙及火焰之偵測器(detectors)，許多無效。
- b.列車上感應器(sensors)，未能提供正確之警告訊號。
- c.預鑄鋼筋混凝土襯砌，防火設計不理想，無法通過大火之考驗。
- d.列車失去牽引動力(Traction power)相信由熱度及濃煙引起，導致動力短路。
- e.乘客逃生過程中，有遭遇一些困難。首先，鐵路管制中心(Rail Control Centre)未能充分確認(sufficient precision)失火列車位置，這涉及最近橫向通道(Cross-passage)之使用。因為隧道內濃霧瀰漫，逃生乘客難以找尋到橫向通道。
- f.火警偵測監測盤(Fire detector monitoring panels)應設置於鐵路管制中心(Rail Control Centre)，而不是由火災設備管理中心(Fire Equipment Management Centre)負責管制。
- g.本次火災事故，所有乘客及乘務員如何徒步離開失火地點，均應詳加紀錄。

(4) 涉及程序改進事項

- a.每一班貨物列車駛離前，均需嚴格查檢，並通報鐵路管制中心(Rail Control Centre)。
- b.隧道內接獲火警通知，首先需立即輸入事發位置等資訊，而非等待確認該項通知。
- c.列車長(Chef of train)應主導列車逃生，而不是由司機負責。
- d.如果已有任何火警通報，關閉兩座主隧道間活塞管道(Piston relief duct)及啟動緊急通風系統(Emergency ventilation system; Supplementary ventilation system)，應立即執行。

(五) 歐洲阿爾卑斯山基線隧道 (Base tunnels of the Alps Transit project)

歐洲法國、義大利、瑞士等國，現正進行大型鐵路隧道工程(Railway lines)之規劃、設計、建造等作業，有些工程甚至已通車營運。其中最受矚目之計畫，就屬瑞士境內穿越阿爾卑斯山計畫(The Alps Transit project)，期望將重型貨運(Heavy freight)自擁擠之公路轉移至鐵路，並改善南北向(North-to-south direction)鐵路交通，縮短旅行時間及提供高速之客運系統，由於需降低隧道坡度以提升載運重量及行車速度，並自既有隧道更低之位置增闢新的隧道，故稱為基線隧道(Base tunnel)。〔20〕

本計畫目前有四條基線隧道(圖 57)：

- (1) 里昂-都靈基線隧道(Lyon-Turin base tunnel)
- (2) 布倫納基線隧道(Brenner base tunnel)
- (3) 聖哥達基線隧道(Gotthard base tunnel)
- (4) 勒奇山基線隧道(Lötschberg base tunnel)

其中長達 57 公里之聖哥達基線隧道及 34 公里勒奇山基線隧道，屬現有規模最大之山岳隧道鐵路工程。



New European railway base tunnels

圖 57 歐洲阿爾卑斯山基線隧道平面圖

1. 基線隧道概述 (Overview of base tunnels)

(1) 里昂-都靈基線隧道 (Lyon - Turin base tunnel, 簡稱 BLT)

里昂-都靈基線隧道 (Lyon - Turin base tunnel) 為兩座單孔單軌隧道 (Single tube with single-track), 長達 53.1 公里; 設置橫向通道 (Cross-passage) 連接兩座主隧道及建立一座救援車站 (Rescue station)。另設三處介入點 (Intervention points), 位於 Val Clarea、La Praz 及 Saint-Martin-de-la-Porte (圖 58)。

遇列車緊急事故時, Modane-bis 救援車站及三處介入點, 均有提供逃生旅客使用之緊急停靠站 (Emergency stop)。救援車站及三處介入點, 並可搭乘公路車輛 (Road vehicles) 經由通入隧道 (Access tunnel) 抵達。Modane-bis 救援車站設有旅客必要之逃生設備, 也為事故列車另行建造二股軌道。

主隧道現正設計中, 預定 2020 年通車營運, 預估每天將有 183 班列車行駛, 工程總經費約為 76 億歐元。

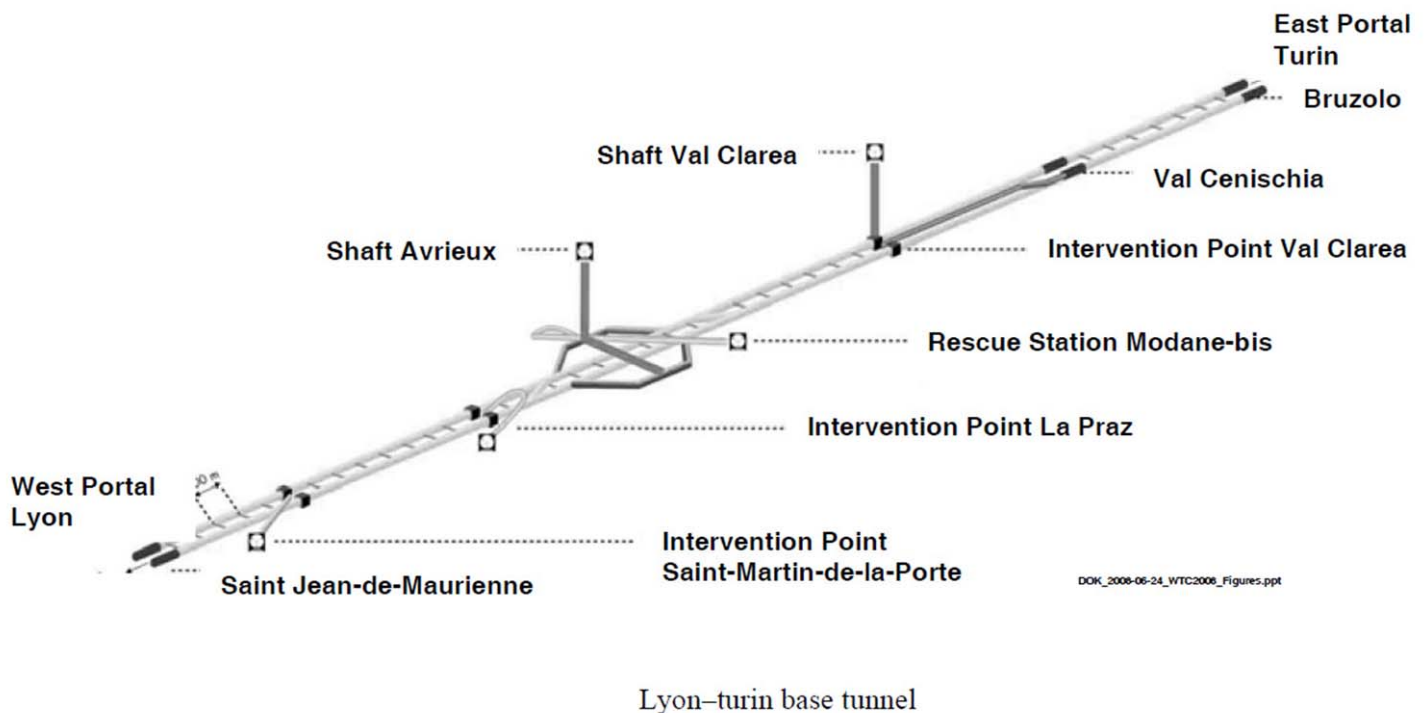


圖 58 里昂-都靈基線隧道

(2) 布倫納基線隧道 (Brenner base tunnel, 簡稱 BBT)

布倫納基線隧道(Brenner base tunnel)同為兩座單孔單軌隧道(Single tube with single-track)，長達 57 公里；也設置橫向通道 (Cross passage) 連接兩座主隧道，另於兩座主隧道間設置一條排水隧道 (Drainage tunnel)，比主隧道深約 10 公尺 (圖 59)。

規劃三座救援車站 (Rescue station)，位於 Innsbruck、Steinach 及 Wiesen，每座救援車站都設有橫渡線 (crossover)。臨近 Innsbruck 救援車站南側之雙軌繞道隧道 (Bypass tunnel)，已於 1990 年先行使用。

三座救援車站，均具有提供逃生旅客使用之緊急停靠站(Emergency stop)，亦可作為養護 (maintenance) 及營運使用，救援車站並可搭乘公路車輛 (Road vehicles) 經由通入隧道 (Access-tunnel) 抵達。此外，Steinach 救援車站亦設有旅客必要之逃生設備，也為事故列車另行建造二股軌道。

目前主隧道設計中，預定 2020 年通車營運，預估每天將有 264 班列車行駛，工程總經費約為 50 億歐元。

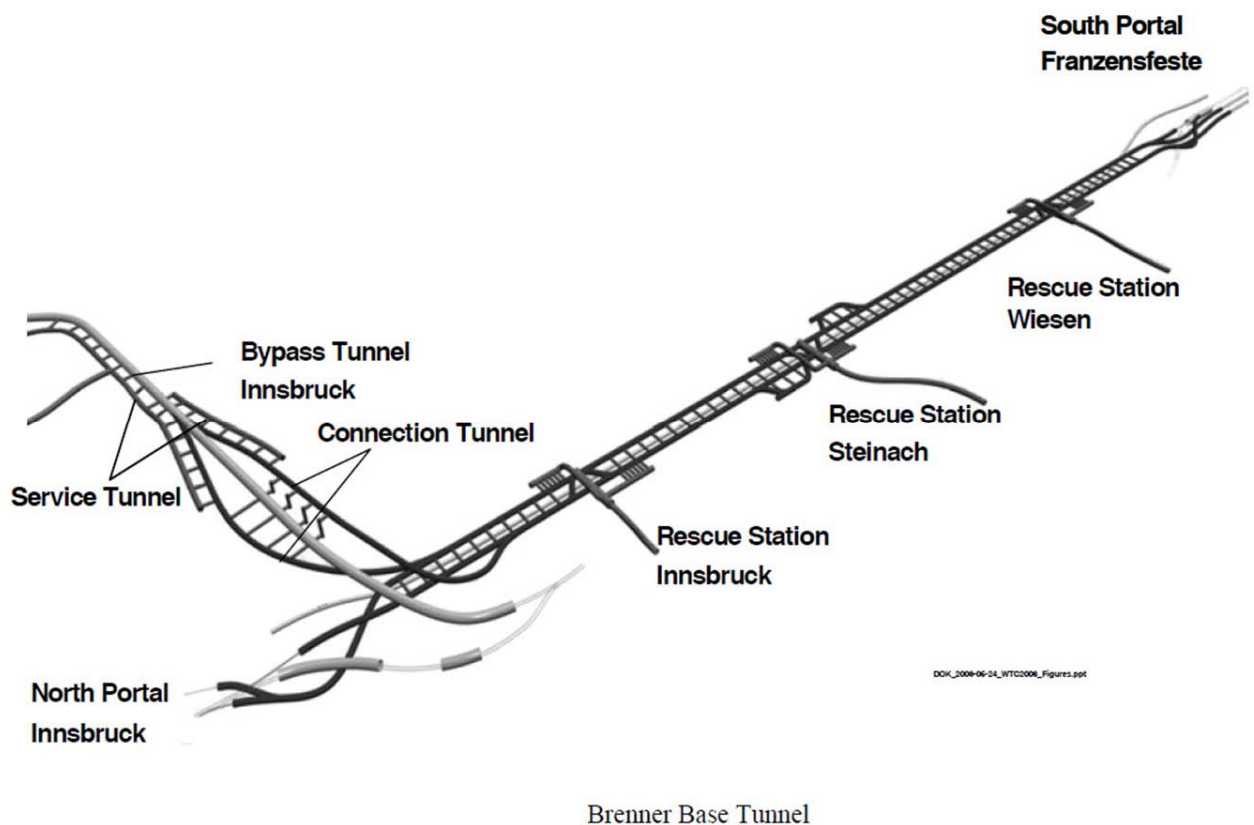


圖 59 布倫納基線隧道

(3) 聖哥達基線隧道 (Gotthard base tunnel, 簡稱 GBT)

同前二個隧道斷面，里昂-都靈基線隧道 (Lyon - Turin base tunnel) 為兩座單孔單軌隧道 (Single tube with single-track)，長 57.1 公里；亦設置橫向通道 (Cross passage) 連接兩座主隧道。

二座救援車站 (Rescue station)，位於 Sedrun 及 Amsteg，每座救援車站都設有橫渡線 (crossover) (圖 60)。

二座救援車站 (Sedrun & Faido)，均具有提供逃生旅客使用之緊急停靠站 (Emergency stops)，亦可作為養護 (maintenance) 及營運使用。二條通入隧道 (Access tunnel)，都位於 Sedrun 及 Faido，均可使用公路車輛。Sedrun 救援車站，並可由二個豎井 (vertical shafts) 進入。

目前聖哥達基線隧道施工中，預定 2017 年通車營運，預估每天將有 294 班列車行駛，工程總經費約為 54 億歐元。

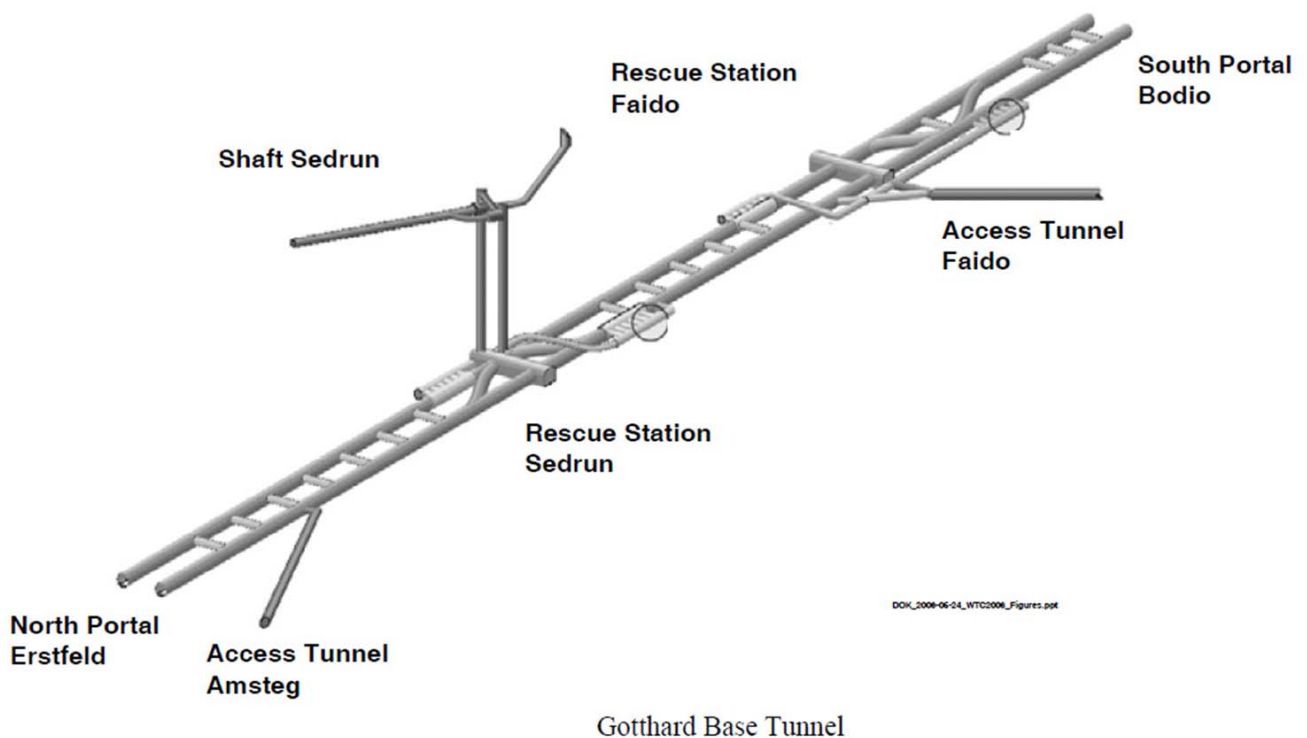


圖 60 聖哥達基線隧道

(4) 勒奇山基線隧道 (Lotschberg base tunnel, 簡稱 LBT)

勒奇山基線隧道 (Lotschberg base tunnel) 亦為兩座單孔單軌隧道 (Single tube with single-track), 長 34.6 公里; 亦設置橫向通道 (Cross passage) 連接兩座主隧道。

二座救援車站 (Rescue station), 位於 Ferden 及 Mitholz, 每座救援車站都設有橫渡線 (crossover) (圖 61)。

目前聖哥達基線隧道, 業於 2007 年通車營運, 每天有 110 班列車行駛, 工程總經費為 26 億歐元。

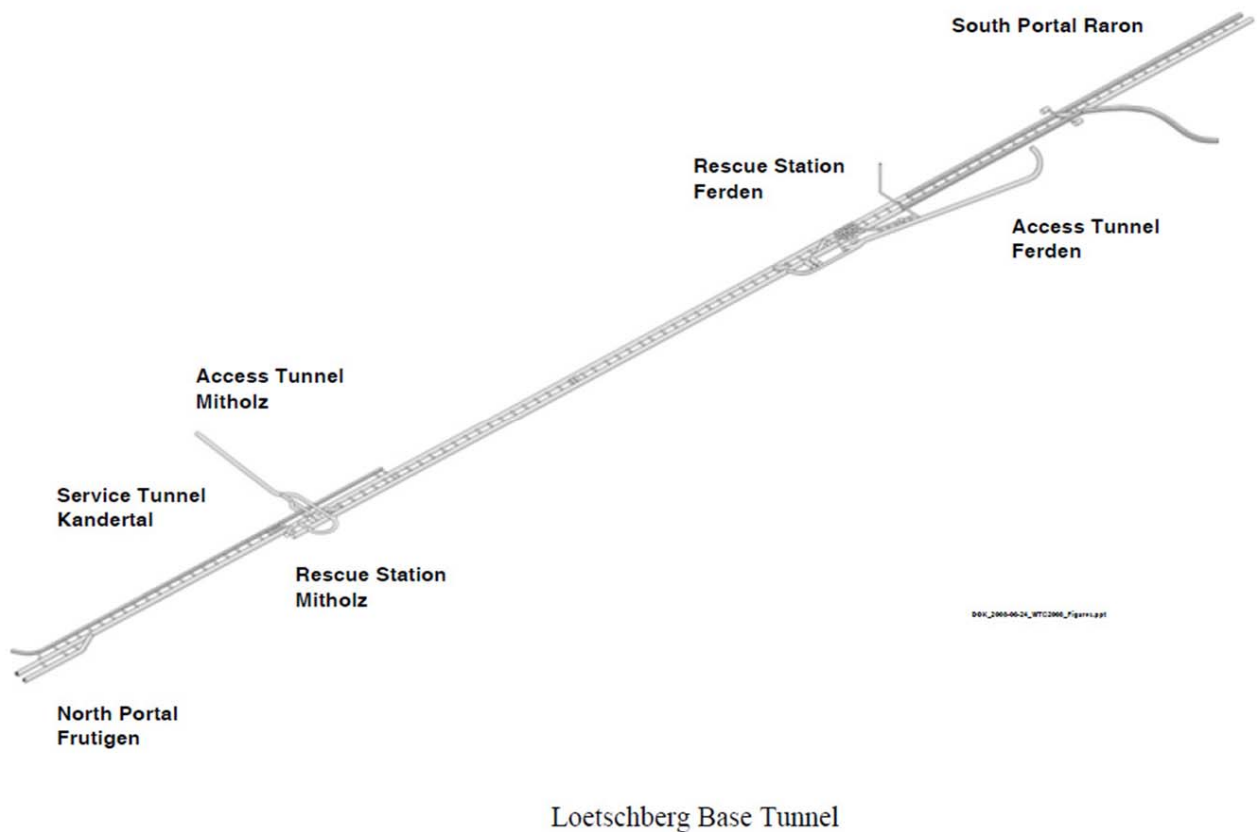


圖 61 勒奇山基線隧道

2. 隧道通風型式 (Types of tunnel ventilation)

長隧道通風 (Tunnel ventilation)，無疑必須符合廣泛的要求。一般而言，通風運作 (Ventilation operations) 有三種型式。

- 正常運作 (Regular operation)：正常列車行駛時之通風運作。
- 養護運作 (Maintenance operation)：進行隧道養護作業，列車短暫停駛時之通風運作。
- 事故運作 (Incident operation)：發生列車事故時之通風運作（特別是列車火災及危險氣體）。

針對阿爾畢斯山基線隧道之四項隧道工程，其隧道通風使用之風扇 (fan) 位置及風扇動力 (fan power)，請詳見表 12 (fan rate)。隧道通風運作時，節風門 (damper)、氣閘 (air lock) 及抽送管道 (Supply and extraction duct) 需配合進行空氣流通。隧道通風之運作，經常由隧道管制中心 (Tunnel control centre) 遙控管制。

3. 隧道通風目標及運作 (Objectives & Operation of tunnel ventilation)

(1) 通風正常運作 (Regular operation)

隧道內熱度，來自於周遭岩石之釋放，額外的熱度則由行駛列車及隧道內機械設備所產生。為確保隧道通風之正常運作 (Regular operation)，隧道內溫度必須維持於攝氏 35 度上限以下。在所有的隧道，隧道空氣之涼爽程度，主要由氣閘 (Piston) 影響移動列車。如果列車在炎熱夏季月份，列車空氣轉換 (air-change) 不足，就由隧道通風系統進行冷卻 (如 BBT, GBT)，或是以冷卻水 (cooling water) 沿著隧道路線處理 (如 BLT)。

(2) 通風養護運作 (Maintenance operation)

隧道進行養護作業，隧道通風系統必需能確保養護區域人員職業安全及健康需求 (Occupational health requirement)。隧道內空氣交換 (Air-exchange)，係由抽送風扇 (Supply and extraction fans) 運作提供；以此方式，隧道內能擁有充足新鮮空氣，符合養護區域人員職業安全健康需求。通風原則，其實無差異。

表 12 風扇站及風扇動力

隧 道 (Tunnel)	風扇站 (Fan stations)	風扇動力(m ³ /s)	
		空氣輸送量 (Air Supply)	空氣排出量 (Air exhaust)
里昂-都靈基線隧 (Lyon - Turin base tunnel)	Saint Martin-de-la-porte	2 × 90	3 × ± 200
	La Praz	2 × 90	3 × ± 200
	Shaft Arieux/Modane	2 × 200	6 × ± 200
	Shaft de Val Clarea	2 × 120	3 × ± 200
	Total	1,000	± 3,000
布倫納基線隧道 (Brenner base tunnel)	Rescue station Innsbruck	2 × 200	2 × ± 250
	Rescue station Steinach	2 × 200	2 × ± 250
	Rescue station Wiesen	2 × 200	2 × ± 250
	Total	1,200	± 1,500
聖哥達基線隧道 (Gotthard base tunnel)	Rescue station Sedrun	2 × 200	2 × ± 250
	Rescue station Faido	2 × 200	2 × ± 250
	Total	800	± 1,000
勒奇山基線隧道 (Lotschberg base tunnel)	Access tunnel Mitholz	2 × 150	
	Emergency station Ferden	2 × 200	2 × ± 250
	Total	700	± 500
備註：± 表示為雙向風扇（Reversible fans），可進行空氣吸排操作。			

(3) 通風事故運作 (Incident operation)

針對失事列車及旅客因應處理，事故運作 (incident operation) 關鍵在於原有之通風設計，需符合下列通風目標：

- 發生火災列車緊急停止時，需確保旅客有一處受保護之等待區(等待區需由外以高壓輸送空氣)。
- 支持沿著緊急停靠站 (emergency stop) 列車旅客之自救 (self-rescue) 行為 (沿著緊急停靠站區域排除濃煙)。
- 經由無事故隧道，提供一條逃生路徑 (避免濃煙擴散至無事故隧道)。

- 失火列車發生在緊急停靠站（emergency stop）外，也支持列車旅客之自救行為(在火源處影響濃煙之擴散)。

依據事故列車停駛於隧道緊急停靠站之內外位置，使用原則如下：

- 列車停於隧道緊急停靠站內：

使用事故通風系統（incident ventilation system），有效提供足夠空氣。在所有的隧道計畫，新鮮空氣都是由外面經由通入隧道（access tunnel）輸入，以避免吸入列車濃煙。也從緊急停靠站排除有濃煙之空氣，使濃煙之擴散減至最低。

濃煙排除策略，視隧道不同而有所差異。LBT,BLT 及 GBT：係接近火源以節風門（damper）予以控制，BBT：則在緊急停靠站中間設置一排除點處理。

- 列車停於隧道緊急停靠站外：

新鮮空氣係由無事故隧道提供，以免旅客逃生過程中，濃煙進入無事故隧道。為使旅客於出事隧道容易自救（self-rescue），火源處濃煙之擴散需減至最小（minimized）。

BBT,GBT 及 LBT，有運作設備改善情況（如降低出事隧道正常列車行駛速度，以維持濃煙層化現象）。里昂-都靈基線隧道視列車火災地點，另行啟動事故通風系統影響濃煙之擴散（可使濃煙移位，濃煙變薄，火源處濃煙擴散減至最小）。

- 如果出事列車停在里昂-都靈基線隧道之其中介入點（Intervention），等待區將以新鮮空氣輸入通入隧道（Access tunnel）排除濃煙；同時濃煙並於介入點中間內被抽離，因此出事列車之濃煙擴散將減至最小。

4. 隧道安全概念（Tunnel safety concepts）

（1）安全措施（Safety Measures）

阿爾卑斯山基線隧道，其一般主要安全措施（Safety Measures）如下：

- 兩座單孔單軌隧道（Two single-track tunnels）含正向及反向，各一座。
- 設置救援車站（Rescue Station）。
- 橫向通道（Cross-passage）以固定間距，連接單軌隧道。
- 兩座單孔單軌隧道，設置緊急停靠站（Emergency stop）通入，使遇列車緊急事故時，可知到達緊急停靠站之預估時間（特別針對列車事故旅客）。
- 里昂-都靈基線隧道兩座單孔單軌隧道，另外為事故貨運列車設置介入

點 (Intervention)。

阿爾畢斯山基線隧道之必要安全設備，彙整於表 13。本表係基於警報 (alarm) 及救援概念原則 (rescue concepts) 製作。

(2) 救援程序 (Rescue procedure)

無論何時發生事故，首先將出事列車駛離隧道，此為最高原則；若不能執行，即停駛於洞口附近之救援車站 (Rescue station) 或是介入點 (Intervention)。再由控制中心 (Control room) 運作相關防災設備，使出事列車駛離隧道，洞口處則嚴禁任何列車進入。

a. 旅客列車

如果旅客列車到達緊急停靠站 (emergency stop)，逃生旅客需沿著逃生路徑 (escape route) 進入緊急停靠站受保護之等待區 (waiting area) 內，該區域由外輸入新鮮空氣及防止旅客吸入濃煙及高溫。旅客將由無事故隧道緊急停靠站，搭乘避難列車進行疏散 (evacuation)。

假設列車停駛於隧道內任何地點，逃生旅客需通過橫向通道 (Cross-passage) 進入無事故隧道；事故通風系統 (incident ventilation system) 會以高壓將新鮮空氣輸入無事故隧道，確保及保護等待區旅客安全，旅客亦將搭乘避難列車進行疏散。

b. 貨運列車

如果貨運列車未能駛離隧道，需停於隧道內，司機與旅客列車旅客相同，需通過橫向通道 (Cross-passage) 進入無事故隧道。針對停於隧道內之貨運列車，尚沒有其他配合設施。里昂-都靈基線隧道，為事故貨運列車有設置介入點 (Intervention)，服務人員可由外面進入並配置安全系統。

表 13 阿爾畢斯山基線隧道安全設備

設 備	BLT 里昂-都靈 (53.1KM) 2020 年	BBT 布倫納 (57KM) 2020 年	GBT 哥達 (57.1KM) 2017 年	LBT 勒奇山 (34.6KM) 2007 年
一、隧道及洞口 (Tunnels and portals)				
1. 逃生標誌	○	○	○	○
2. 緊急照明及扶手	○	○	○	○
3. 水滅火設備	○	○		
4. 熱軸箱偵測系統	○	○		
5. 載重位移偵測器	○			
6. 火警偵測器	○			
7. 瓦斯警報器	○			
8. ETCS 2 控制系統	○	○	○	○
9. 擴音器系統	○	○		
10. 視訊影像系統 (洞口)	○	○	○	○
二、緊急停靠站 (Emergency stops)				
1. 煙霧排除系統	○	○	○	○
2. 泡沫滅火系統	○			
3. 水滅火設備	○	○	○	○
4. 視訊影像系統	○	○	○	○
5. 火災位置偵測器	○		○	○
6. 電話	○	○	○	○
7. 擴音器系統	○	○	○	○
三、橫向通道 (Cross-passages)				
1. 管制門	○	○	○	○
2. 水滅火系統	○	○		
3. 火警偵測器	○			○
4. 電話	○	○	○	○
5. 擴音器系統	○	○		
6. 進出控制	○	○	○	○
7. 視訊影像系統	○	○		
8. 泡沫滅火系統		○		

六、心得

（一）地震預警系統

1. 日本自 1995 年「阪神大地震」重創之後，記取慘痛經驗，傾全力發展地震預警系統。目前氣象廳地震預警系統（JMA- EEW）經測試後，已於 2007 年 10 月正式上線，為全球先進且具精密分析能力之地震預警系統。當地震發生，達到氣象廳地震震度 3 級（3L）或略大時，EEW 系統將對企業使用者（advanced users）傳出預報（forecast）；若地震強度在 5 級略小或以上（5L or greater）震度時，便對一般民眾（general public）經由電視、收音機、媒體、網際網路、手機等發布警報（warning），有助於提前採取防災及避難措施。
2. 「日本新幹線地震預警系統」已由第一、二代（S 波，沿線及海岸線檢知系統），第三、四代【P 波→S 波，沿線及海岸線（個別地震偵測器及地震偵測器聯網）檢知系統】，發展至 JMA EEW 系統（新世代）。偵測 P 波至發布警報之處理時間，並已縮減至 1 秒（如 Compact UrEDA 系統），可使新幹線提前採取停車等因應措施。

因應地震來臨，有關高鐵列車停車之處置，臺灣高鐵已建立符合需求之災害預警系統（DWS），目前係採用 S 波檢知系統。是否依「日本新幹線地震預警系統 JMA EEW」，提升至 P 波→S 波檢知系統，仍視未來實際所需、經費等客觀因素決定。

另有關日本地震預警系統，目前尚未無有應用於一般鐵路（在來線）之案例，現以無線電方式傳送列車停車（請見圖 22 及圖 24），提供臺鐵參考。

（二）鐵路邊坡預警監控機制

本次研究取自日本之實際案例，為東日本鐵道公司（East Japan Railway Company, EJ R）因應豪雨來襲，依據 25 年全線雨量、事故數量等歷史資料，並以 1.5 時、6 時、24 時最佳半衰期（half life）之有效累積雨量臨界值，所建置之 EJ R 全線邊坡預警系統，長約 7,000 公里，雨量計以每 10 公里設置 1 處。

EJ R 使用之系統較日本傳統「時雨量」及「連續雨量」之警報方式，更為準確，雨量計設備無專利（patent）問題，且有建置及維護費用低（雨量計，約 30 萬日幣／處）之優點。

就臺鐵應用 EJ R 案例而言，參考之辦理程序及事項如後：

1. 首先請確認最具急迫性且危險之營運路段。
2. 檢視所需建置路段，是否擁有雨量、事故數量等歷史資料。

- 3.依據上述資料，進行最佳半衰期（half life）模式計算，確認最佳半衰期及其對應之有效累積雨量臨界值。
- 4.辦理規劃作業，評估所需期程、雨量計設備、傳送設施等工程費用（含維護管理費等）。
- 5.完成建置工程。

（三）鐵路長隧道防災

- 1.現今日本及歐洲國家，對於鐵路長隧道「單孔雙軌」及「雙孔單軌」兩種主要斷面形式之選定，各有其看法。依據實際工程案例（表 7）顯示，日本均採用「單孔雙軌」；歐洲多數國家則偏向使用「雙孔單軌」，尤其是 20 公里以上之長隧道。就 7.8-18.7 公里部分，意大利、瑞士及法國亦有使用「單孔雙軌」之案例。
- 2.鐵路長隧道防災體系之建置，需於規劃階段即考量所需豎井、橫坑、橫向通道、緊急車站等工項，於施工中及營運後所具之角色及防災避難功能。
- 3.依英法隧道及青函隧道工程案例，主隧道之風率需能穩定維持於 1 公尺/秒（m/s），該數據可供參酌。
- 4.為早期偵測列車火災，青函隧道於進出口及內外處，裝設有火災紅外線（infrared rays）熱度偵測機（計 8 處），具守護神功能，偵測效果良好。
- 5.青函隧道特別針對地震，設置地震儀（NEWS 改良型）、早期地震預警檢知系統（UrEDAS）、傾斜儀及湧水檢知系統等防災設施，實屬土建工程難得之案例。
- 6.行駛於青函隧道之營運列車，係由位於函館及青森間之中央監控室（Control Center）統一管制。各列車所在位置及隧道內各項設備現況（含氣象、電力、號誌、空氣速率、火災、地震儀、傾斜儀、湧水、照明、電視監測器等），均可精準顯示於監控面版（panel）或 PC 螢幕，駕駛員（locomotive driver）並可於任何時間使用無線電與監控室調度員（diapacher）聯繫。青函隧道中央監控室之設置案例，可作為臺鐵建置長隧道工程監控中心之應用參考，規劃作業之關鍵因素計有工程特性、監控項目、經費、工作人員、預期效益、傳輸時間及使用系統等，請臺鐵參考。
- 7.依據阿爾卑斯山計畫（The Alps Transit project）所轄四條基線隧道之安全設備，計有三大類（25 分項，見表 13），足見防災需求，日趨受到關注。

七、建議事項

（一）地震預警系統

日本全力發展之地震預警系統（JMA EEW），已具發布預報及警報功能，值得我方學習，建請參酌。

（二）鐵路邊坡預警監控機制

JR 東日本針對豪雨，所建置之鐵路沿線邊坡預警系統，係採取 1.5 時、6 時、24 時最佳半衰期（half life）之有效累積雨量臨界值，取代傳統「時雨量」及「連續雨量」之警報方式，建請參考。

（三）鐵路長隧道防災

- 1.對於鐵路長隧道「單孔雙軌」及「雙孔單軌」兩種斷面形式之選定，日本及歐洲國家，見解仍相異。建請視執行計畫地形、地質、防災、經費等相關因素，審慎決定。
- 2.規劃階段即考量所需豎井、橫坑、橫向通道、緊急車站等工項，於施工中及營運後所具之角色及防災避難功能，對於防災體系之建置，極為關鍵，建請審慎考量。
- 3.青函隧道於進出口及內外處，裝設有火災紅外線（infrared rays）熱度偵測機（計 8 處），可早期偵測列車火災，建議規劃階段考量納入具類似功能之偵測設備。
- 4.阿爾卑斯山計畫（The Alps Transit project）所轄四條基線隧道之安全設備，計有三大類（25 分項，見表 13），建請參酌。

参、参考文献

1. Shozo MATSUMURA, Development of an Earthquake Early Warning System and Its Benefits, 2011.
2. 日本地理，維基百科。
3. Earthquake Early Warning Starts Nationwide in Japan, EOS, TRANSACTIONS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, 2008.
4. Keiji Doi, The operation and performance of Earthquake Earthquake Warnings by the Japan Meteorological agency, 2010.
5. K. Masaki, S. Kurahashi, T. Ochiai, Development of Emergent Alarm System using the Earthquake Early Warning by Japan Meteorological Agency, 2012.
6. Shunroku Yamamoto, Presentation for Earthquake Early Warning System for High-speed Railways, 2014..
7. Makoto SHIMAMURA, Presentation for How Japan' s Bullet Trains Survived the 2011 Tohoku Great Earthquake , 2013.
8. Yutaka Nakamura, Jun Saita, Tsutomu Sato, On an earthquake early warning system (EEW) and its applications, 2011.
9. 日本新幹線地震預警系統，交通部高速鐵路工程局。
10. 高鐵路災害告警系統（Disaster Warning System, DWS），交通部高速鐵路工程局。
11. Makoto Shimamura, Osamu Suzuki, Keiichi Yamamura, Improving Alert Thresholds for Safer and Stabler Train Operation under Heavy Rainfalls, JR EAST Technical Review No.11.
12. Terje Anderson & Borre J. Paaske, Safety in railway tunnels and selection of tunnel concept.
13. Matous Hilar, Martin Srb, LONG RAILWAY TUNNELS – COMPARISON OF MAJOR PROJECTS.
14. 佐佐木富泰，鐵道史事故，1995 年 11 月 10 日。
15. ZHANG Nian, TAN Zhong-sheng, Research on Measures of the Disaster Prevention and Rescue in Super-long Railway Tunnels, 2011.
16. F. Vuilleumier, A. Weatherill, B. Crausaz, Safty aspects of railway and road tunnel: example of the Lotschberg railway tunnel and Mont-Blanc road tunnel, 2002 ITA Open Section: Fire and Life Safty.
17. D. Diamantidis, F. Zuccarelli, A. Westhauser, Safty of long railway tunnels, 1999
18. Shogo Matsuo, An Overview of the Seikan Tunnel Project, 1986 Pergamon Journals Ltd..
19. C. j. Kirland, The proposed Design of the English Channel Tunnel, 1986 Pergamon Journals Ltd..
20. A. Busslinger, Ch.Rudin & P. Reinke, New railway base tunnels through the European ALPS, World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safty - India.