



隧道工程落磐與湧水風險管理

一、前言

長隧道開挖工程是危險性工作場所的一種。隧道施工事前皆需要經過縝密的安全規劃及地質調查，但由於施工技術、工期與預算的限制，以及隧道地質的複雜多變，致使隧道開挖時仍可能發生落磐與湧水的事故。例如近期中國大陸某隧道，在 110 年 7 月 15 日發生隧道內湧水的重大職業災害，雖然經過連日不斷搜救，但仍在 7 月 22 日宣布 14 名被困工程人員均已罹難，也再次突顯工程設計或施工規劃階段之風險評估、危害辨識、分析及評量風險之重要性。

因此，本文將摘述國內外關於隧道工程落磐與湧水的風險管理作法，以及營造業安全衛生數位科技的輔助應用，提供給工程主辦機關參考。

二、隧道落磐與湧水的風險管理

相關研究指出^[1]，引發落磐的主要原因為地質因素，而引發湧水的主要原因為環境因素，其類型如表 1 所示。

表 1. 導致落磐與湧水的主要原因與類別^[1]

落磐		湧水	
原因	類別	原因	類別
地質因素	節理、層理發達	環境因素	大雨
	斷層、剪裂帶		地下水
	不平衡土（岩）壓		地質裂隙
			地層滲透性高

此外，依據工程經驗，開挖斷面、隧道長度與落磐、湧水之發生息息相關，開挖斷面越大或隧道長度越長，遭遇可能發生落磐與湧水的地質、地層可能性也越大。

根據 BS 6164: 2019 標準「營造業隧道工程安全衛生實踐準則 (Health and safety in tunnelling in the construction industry - Code of practice)」的說明^[2]，除了常見的風險等級之外，針對低機率而高嚴重度 (low frequency but high consequence events) 的事件 (例如大規模落磐或湧水)，其後果對於業主、設計監造單位、施工單位等都是非常嚴重而不可接受的，應謹慎進行風險評估、危害辨識、分析及評量風險，在危害與風險管理系統 (hazard and risk management system) 中考慮。

在國內相關法令規定方面，我國**營造安全衛生設施標準**對於隧道工程列有專章規定，第六章「隧道、坑道開挖」自第 80 條至第 102 條，共計 24 條，條文內容包含隧道、坑道開挖作業應設置之業務主管、地質調查、施工計畫書、崩塌預防措施、危險工作場所出入人員及車輛機械之管控、施工計畫之變更、緊急情況之作業停止及疏散、防護裝備及緊急搶救設備、支撐材料、支撐設計及施工原則、每日及震後支撐之檢查、內部通路設置等，均有詳細規定。此外，**職業安全衛生設施規則**第九章「墜落、飛落災害防止」對於坑內落磐及土石崩落之防止均有規定，其中第 236 條規定雇主為防止坑內落磐、落石或側壁崩塌等對勞工之危害，應設置支撐或清除浮石等；第 238 條規定雇主對工作場所有物體飛落之虞者，應設置防止物體飛落之設備，並供給安全帽等防護具，使勞工戴用。

在國外相關規定方面，英國、美國、日本、奧地利、加拿大等許多國家對隧道工程風險管理與施工安全管理均有詳細規定與實務作法，以英國為例，英國在 2001 年發布 BS 6164: 2001 標準，並於 2019 年修正發布 BS 6164: 2019 標準，對營造業隧道工程安全衛生與風險管理提出系統化的要求。

BS 6164: 2019 標準認為隧道工程風險來自於不穩定地層、地下水、噪音、粉塵、異常氣壓、移動機械、電氣等危害，這些風險可能會傷害人員、隧道或周遭環境。因此，必須從工程規劃、設計階段、施工階段，到營運維護階段等全生命週期，持續地實施危害與風險辨識、風險評估、風險監視與管制、風險溝通等風險管理程序。

BS 6164: 2019 標準共有 26 個章節，內容涵蓋風險管理、調查與資訊蒐集、安全衛生細部規劃、開挖與地盤移動的管制、永久性支撐、地下水管理、洪水、壓氣施工作業、爆炸性氣體、火災與煙霧、緊急事件應變、通風、粉塵、懸浮微粒與其他污染物、照明品質、作業溝通、噪音與振動、豎井、開挖與管線、揚升設備與作業、通道、材料搬運系統、隧道設備、電氣、維護、改建與修復等。

BS 6164: 2019 標準的章節架構及與 BS 6164: 2001 標準的差異如表 2 所示。

表 2. BS 6164: 2019 標準章節與差異分析^[2]

章節	BS 6164: 2019 標準	BS 6164: 2001 標準
1	前言 Scope	
2	引用標準 Normative references	
3	名詞與定義 Terms and definitions	
4	風險管制 The control of risk	
5	調查與資訊蒐集 Investigation and information gathering	
6	安全衛生細部規劃 Detailed planning for health and safety	
7	開挖與地盤移動的管制 Excavation and control of ground movement	開挖與地盤支撐 Excavation and ground support
8	永久性支撐 Permanent support	
9	地下水管理 Management of groundwater	
10	洪水 Inundation	
11	壓氣施工作業 Compressed-air working	
12	爆炸性氣體 Explosive atmospheres	沼氣 Methane
13	火災與煙霧 Fire and smoke	
14	緊急事件應變 Response to emergencies	消防與救援 Fire-fighting and rescue
15	通風 Ventilation	
16	粉塵、懸浮微粒與其他污染物 Dust, particulates and other contaminants	粉塵 Dust
17	照明品質 Quality of illumination	
18	作業溝通 Operating communications	
19	噪音與振動 Noise and vibration	
20	豎井、開挖與管線 Shafts, pits and piles	豎井 Shafts

21	揚升設備與作業 Lighting equipment and operations	揚升設備 Lighting equipment
22	通道 Access	
23	材料搬運系統 Materials handling systems	搬運與出碴 Transport and loading
24	隧道設備 Tunnel plant	
25	電氣 Electrical	
26	維護、改建與修復 Maintenance, renovation and repair	

雖然 BS 6164: 2019 標準與 BS 6164: 2001 標準的章節架構一致，但章節名稱與章節內容都依照時代的演進與技術的發展進行修改，其中包括數位科技的應用。在 BS 6164: 2019 標準中提到應使用數位科技以進行持續即時的風險監測（continuous real-time risk monitoring），以提供數據驅動的洞察力（data driven insights），並使用這些洞察力以做出更明智的決策（informed decision making）。

三、數位科技在隧道工程風險管理的應用

目前，國外已有許多數位科技在隧道工程風險管理的實務應用。如圖 1 所示，該案例整合了物聯網（IoT）、雲計算、人工智慧（AI）、沈浸式科技（AR/VR）、機器人等數位科技，藉以提高隧道工程風險管理與緊急應變的能力^[3]。

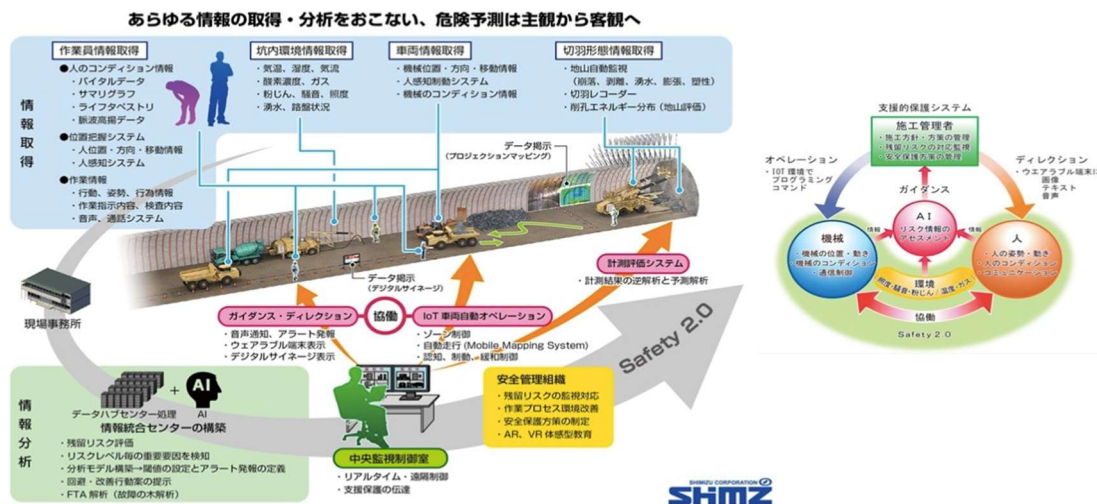


圖 1. 數位科技在隧道工程風險管理應用案例^[3]

許多工程也都逐步發展數位科技的整合應用，提高隧道工程的風險管理能力。如圖 2 所示，除了物聯網、雲計算等數位科技，也整合了 3D 模型以聯結隧道工程相關的構造物、地形、地層、設計等資訊^[4]，建立隧道工程風險資訊儀錶板。



圖 2. 隧道工程風險資訊儀錶板應用案例^[4]

自動化與機器人也是營造安全數位科技應用的重要發展方向。如圖 3 所示，在施工人員難以抵達之區域使用頭戴式顯示器（HMD）來操作營建機械，整合物聯網、沉浸式科技、自動化、機器人等數位科技，建立遠端遙控隧道工程施工機器人，可從本質上減少風險^[5]。

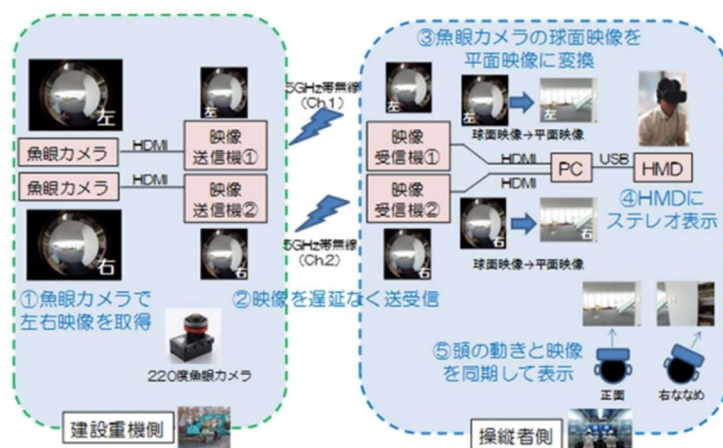


図1 臨場型遠隔映像システムの構成



図2 本システム設置掘削機



図3 本システム遠隔操作状況

圖 3. 隧道工程遠端遙控機器人應用案例^[5]

職安署為提供各界更多的營造安全數位科技應用資訊，在營造業職業安全衛生管理系統資訊應用平台中定期發布營造業安全衛生電子報（圖 4，網址：<https://coshms.osha.gov.tw/Newsletter>），介紹國際職安衛管理與數位科技發展^[6-7]。



圖 4.營造業安全衛生電子報瀏覽區

此外，職安署也彙整國際數位科技發展的技術摘要於營造減災精進資訊下載區（圖 5，網址：<https://www.yuejin-ai.com:967/fs/files>）提供知識共享。

營造減災精進				
名稱	最後修改日期	檔案大小	下載次數	
Covid-19 防疫宣導	2021-06-19 19:09:35			
健全法規制度	2021-06-19 19:08:22			
推動自主管理機制	2021-06-19 19:08:40			
減災願景策略目標	2021-06-19 19:08:06			
營造工程職業安全衛生管理識別標示	2021-07-22 17:44:59			
擴大宣導行銷量能	2021-06-19 19:09:09			
職安衛技術摘要	2021-06-23 11:01:16			
職安衛電子報	2021-06-23 11:00:46			
職業災害訊息	2021-06-19 19:09:22			

圖 5. 營造減災精進資訊下載區

四、結語

隧道工程之施工風險高，應由工程業主、設計者、施工者及使用者等權責單位於營造工程全生命週期各階段按職業安全衛生法及相關法規之規定，依風險辨識、分析、評量等程序整體評估，落實各項安全衛生作為，才能將風險控制在最低合理可行範圍，提升施工安全；並參考前車之鑑，分析發生原因及改善作為，融合國際優良之風險管理實務作法，吸收國際數位科技應用經驗，以精進風險管理與緊急應變能力，降低職業災害發生。

參考文獻

- [1] 林耀煌 (2004)，隧道內落磐與湧水安全監測防災系統研究，勞動部勞動及職業安全衛生研究所。
- [2] BSI. (2019). BS 6164: 2019 Health and safety in tunnelling in the construction industry - Code of practice.
- [3] 日本建災防. (2019a). 労働災害防止のための ICT 活用データベース. ICT 活用事例: CIM モデル活用によるトンネル工事施工情報管理システム.
Available at: https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/ict/entry/003081.html
- [4] 日本建災防. (2019b). 労働災害防止のための ICT 活用データベース. ICT 活用事例: C I M活用シールド掘進監視システム〔T-CIM®/Shield〕.
Available at: https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/ict/entry/003123.html
- [5] 日本建災防. (2019c). 労働災害防止のための ICT 活用データベース. ICT 活用事例: 臨場型遠隔映像システム〔T-iROBO Remote Viewer〕.
Available at: https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/ict/entry/003396.html
- [6] 營造業職安衛科技的國際發展現況探討，營造業安全衛生電子報。
Available at: <https://coshms.osha.gov.tw/Newsletter/20201029.aspx>
- [7] 數位科技在台灣營造業職業安全衛生管理的應用 — 以 109 年度金安獎科技應用為例，營造業安全衛生電子報。
Available at: <https://coshms.osha.gov.tw/Newsletter/20201029.aspx>