

115-010-7E10
MOTC-IOT-114-H1CA001d

鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型 之應用探討



交通部運輸研究所

中華民國 115 年 3 月

115-010-7E10
MOTC-IOT-114-H1CA001d

鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型 之應用探討

著者：黃宇謙、胡啟文

交通部運輸研究所

中華民國 115 年 3 月

GPN : 1011500171

定價 200 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之
應用探討/黃宇謙,胡啟文著.--初版.--臺北市:交
通部運輸研究所,民 115.03

面;公分

ISBN 978-986-531-744-7(平裝)

1.CST: 交通管理 2.CST: 風險管理 3.CST: 運輸系
統 4.CST: 人工智慧

557

115001234

鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

著者:黃宇謙、胡啟文

出版機關:交通部運輸研究所

地址:105004 臺北市松山區敦化北路 240 號

網址:www.iot.gov.tw (中文版>數位典藏>本所出版品)

電話:(04)2658-7200

出版年月:中華民國 115 年 3 月

印刷者:

版(刷)次冊數:初版一刷 44 冊

書同時登載於交通部運輸研究所網站

定價:200 元

展售處:

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話:(02)2349-6789

國家書店松江門市:104472 臺北市中山區松江路 209 號•電話:(02)2518-0207

五南文化廣場:400002 臺中市區中山路 6 號•電話:(04)2226-0330

GPN: 1011500171 ISBN: 978-986-531-744-7 (平裝)

著作財產權人:中華民國(代表機關:交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利,欲利用本著作全部或部分內容者,須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討			
國際標準書號(或叢刊號) ISBN 978-986-531-744-7(平裝)	政府出版品統一編號 1011500171	運輸研究所出版品編號 115-010-7E10	計畫編號 MOTC-IOT-114-H1CA001d
本所主辦單位：運輸技術研究中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：黃宇謙 研究人員：胡啟文 聯絡電話：04-2658-7200 傳真號碼：04-2657-1329			研究期間 自 114 年 01 月 至 114 年 12 月
關鍵詞：鐵公路邊坡、分級制度、維護管理、防災應用、人工智慧(AI)、深度學習			
摘要： 交通部施政計畫之目標及策略，揭櫫創新應用智慧運輸科技，結合大數據分析、人工智慧(Artificial Intelligence, AI)、雲端等技術，改善道路壅塞問題、提升道路交通安全、加強安全示警以及推動前瞻智慧運輸技術研發和產業發展。以及運輸政策白皮書提出之「應用 AI、UAV 及遙測技術於鐵公路巡檢或監測」重點行動方案。爰此，111-112 年辦理「多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探」2 年期計畫，113 年辦理「UAV 結合深度學習輔助公路局邊坡防災應用探討」計畫，聚焦於利用 UAV 結合 AI 進行落石型邊坡破壞特徵影像辨識之探討。 本計畫於前期研究基礎上，於今(114)年度探討鐵公路邊坡分級制度結合AI類神經網路模型輔助影像辨識、目標偵測及分類、圖資生成及量體分析等之可行性。主要研究成果計有：(1)蒐集國內外AI於邊坡之相關研究文獻；(2)諮詢專家學者及訪談邊坡管理實務單位；(3)鐵公路邊坡分級制度探討及資料蒐集；(4)邊坡分級制度結合AI類神經網路模型之應用探討。			
研究成果效益： 本計畫完成鐵公路邊坡分級制度結合AI類神經網路模型應用之可行性探討，並提出鐵公路邊坡維管單位未來應用AI之建議。未來亦可做為本所AI技術研發後續相關研究探討與應用。			
提供應用情形： 研究成果提供鐵公路邊坡相關轄管單位，包含：交通部公路局、高速公路局、國營臺灣鐵路股份有限公司、臺灣高速鐵路股份有限公司及農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處等，於鐵公路邊坡管理及災防結合AI之應用參採。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
115 年 3 月	168	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: A Study on the Application of AI Neural Network Models Integrated with Railway and Highway Slope Classification Systems.			
ISBN (OR ISSN) 978-986-531-744-7 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011500171	IOT SERIAL NUMBER 115-010-7E10	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-114-HICA001d
DIVISION: Transportation Technology Research Center DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Yu-Cian Huang PROJECT STAFF: Chi-Wen Hu PHONE: 04-2658-7200 FAX: 04-2657-1329			PROJECT PERIOD From January 2025 To December 2025
KEY WORDS: railway and highway slopes; classification systems; maintenance management; disaster-prevention applications; artificial intelligence (AI); deep learning			
<p>Abstract: The objectives and strategies of the Ministry of Transportation and Communications (MOTC) policy agenda emphasize the innovative application of intelligent transportation technologies. By integrating big data analytics, artificial intelligence (AI), cloud computing, and related technologies, the agenda aims to mitigate road congestion, enhance traffic safety, strengthen hazard-warning systems, and promote the research, development, and industrial advancement of next-generation intelligent transportation technologies. In alignment with the key action plan outlined in the Transportation Policy White Paper—specifically, the application of AI, unmanned aerial vehicles (UAVs), and remote-sensing technologies for railway and highway inspection or monitoring—several research projects have been undertaken. These include the two-year project “Preliminary Study on Multi-Temporal and Multi-Scale Imagery Combined with Deep Learning for the Identification of Slope Geomorphic Variations” (2022–2023), and the 2024 project “Application Study on UAV-Based Deep Learning Techniques to Assist the Highway Bureau in Slope Disaster Prevention,” which focused on UAV-AI-based detection of rockfall-related slope-failure features. Building upon the outcomes of these preceding studies, the present project (2025) investigates the feasibility of integrating railway and highway slope-classification systems with AI-based neural network models for assisted image recognition, object detection and classification, geospatial data generation, and volumetric analysis. The major research outputs include:</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) a comprehensive review of domestic and international studies on AI applications in slope assessment; (2) consultations with experts and interviews with agencies responsible for slope management; (3) an examination of existing slope-classification systems for railways and highways and the compilation of relevant datasets; and (4) an exploration of the application of AI neural network models in conjunction with slope-classification frameworks. <p>Benefits of Research Results: This project completed a feasibility study on integrating the railway and highway slope classification system with an AI-based artificial neural network model. It also proposed recommendations for future AI applications by railway and highway slope maintenance and management authorities. The outcomes of this project may further serve as a reference for subsequent research and application of AI technologies developed by us.</p> <p>Application Availability: The research findings serve as a reference for railway and highway slope-management authorities in applying AI to slope maintenance and disaster prevention.</p>			
DATE OF PUBLICATION Mar. 2026	NUMBER OF PAGES 168	PRICE 200	
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	V
表目錄.....	VII
第一章 緒論.....	1-1
1.1 研究動機	1-1
1.2 研究目的	1-2
1.3 研究範圍及對象	1-2
1.4 研究內容及工作項目	1-2
第二章 文獻回顧	2-1
2.1 邊坡滑動風險評估及災害預測	2-1
2.2 邊坡劣化辨識及結構弱面分析	2-8
第三章 鐵公路邊坡維護管理機制與分級制度探討	3-1
3.1 鐵路邊坡維護管理機制與分級制度	3-1
3.1.1 國營臺灣鐵路股份有限公司	3-2
3.1.2 台灣高速鐵路股份有限公司	3-9
3.1.3 農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管 理處	3-15
3.2 公路邊坡維護管理機制與分級制度	3-19
3.2.1 公路局	3-20
3.2.2 高速公路局	3-32

第四章 鐵公路邊坡維護管理結合 AI 應用說明.....	4-1
4.1 邊坡巡查	4-1
4.2 邊坡地錨檢測	4-7
4.3 邊坡監測	4-7
4.4 邊坡穩定分析及安全評估	4-10
4.5 其他邊坡管理工作	4-13
第五章 結論與建議	5-1
5.1 結論	5-1
5.2 建議	5-3
5.3 成果效益與應用	5-5
5.4 提供政府單位應用情形	5-5
參考文獻.....	參-1
附錄一 專家學者及實務單位諮詢紀錄.....	附 1-1
附錄二 專家學者座談會會議紀錄.....	附 2-1
附錄三 第 1 次工作會議紀要.....	附 3-1
附錄四 第 2 次工作會議紀要.....	附 4-1
附錄五 第 3 次工作會議紀要.....	附 5-1
附錄六 期末報告審查意見處理情形表.....	附 6-1
附錄七 期末報告簡報資料.....	附 7-1

圖目錄

圖 2.1 獲得邊坡敏感性風險評估地圖之研究流程	2-2
圖 2.2 基於 AI 之邊坡穩定性監測數位孿生系統架構	2-3
圖 2.3 標註海綿狀風化區域並區分成訓練和測試資料集	2-8
圖 2.4 利用 RANSAC 演算法識別模型結構面	2-10
圖 2.5 透過不同差異評估指標處理衛星影像	2-11
圖 2.6 應用 AI 判識可能滑動邊坡範圍之結果	2-11
圖 3.1 臺鐵公司邊坡災害潛勢評估流程	3-5
圖 3.2 邊坡災害潛勢判識之邊坡坡長示意圖	3-6
圖 3.3 邊坡災害潛勢判識使用圖資	3-6
圖 3.4 高鐵公司邊坡自動化監測系統	3-11
圖 3.5 高鐵公司降雨警戒指標	3-12
圖 3.6 DWS 偵測器	3-12
圖 3.7 邊坡滑動偵測器作動示意圖	3-14
圖 3.8 高鐵公司之風速、降雨和洪水偵測器	3-14
圖 3.9 阿里山林鐵地理位置及路線	3-15
圖 3.10 阿里山林鐵等高線及坡度	3-16
圖 3.11 公路局 UAV 科技巡檢應用與分析	3-28
圖 3.12 運用 UAV 於台 8 線 176k 九曲洞路段找出落石來源	3-29
圖 3.13 台 9 線 158.3K 邊坡於 0403 地震後之災害	3-29
圖 3.14 公路局使用 UAV 搭載 LiDAR 建立邊坡 DEM	3-30
圖 3.15 公路局佈設之落石告警系統(台 9 丁線 9K+800)	3-31
圖 3.16 邊坡監測儀器配置示意圖	3-39
圖 4.1 YOLO 物件偵測流程	4-3
圖 4.2 高速公路局錨頭保護蓋嚴重度分級示意圖	4-3

圖 4.3 公路局應用多時期空拍影像判識邊坡災害特徵	4-5
圖 4.4 公路局應用 DSM 判識邊坡崩塌面積與量體變異	4-6
圖 4.5 一般深度神經網路(左)和 RNN(右)之結構比較	4-8
圖 4.6 LSTM 運作原理示意圖.....	4-9
圖 4.7 公路局落石微地動監測儀器結合 AI 之應用	4-9
圖 4.8 GNN 簡要結構示意.....	4-10
圖 4.9 阿里山林鐵 AI 影像辨識機制.....	4-11
圖 4.10 臺鐵公司 AI 影像辨識現地照片	4-12
圖 5.1 應用 AI 整體流程	5-2
圖 5.2 鐵公路邊坡結合 AI 輔助應用場景及優勢綜整.....	5-3

表 目 錄

表 2-1 不同時間序列資料特性與模型選擇對照	2-5
表 2-2 各深度學習模型及表現比較	2-6
表 3-1 臺鐵公司邊坡定性分級制度	3-3
表 3-2 PCCR 各岩盤類別之劃分基準建議表	3-3
表 3-3 臺鐵公司邊坡災害潛勢調查表	3-4
表 3-4 臺鐵公司邊坡災害潛勢判識表	3-5
表 3-5 臺鐵公司邊坡災害潛感因子評估參考表	3-7
表 3-6 臺鐵公司巡查初步分級參考項目及評判標準	3-8
表 3-7 臺鐵公司邊坡風險規模評估參考表	3-9
表 3-8 高鐵公司邊坡定性分級制度	3-10
表 3-9 高鐵公司地震告警分級及應對行動	3-13
表 3-10 阿里山林鐵邊坡定性分級制度	3-16
表 3-11 阿里山林鐵邊坡定性分級意涵及因應對策	3-18
表 3-12 阿里山林鐵邊坡監測儀器管理值及因應對策	3-19
表 3-13 公路局邊坡定性分級制度	3-20
表 3-14 公路局邊坡 RHRS 評估因子及危險度定量分級	3-22
表 3-15 公路局邊坡(含相關設施)巡查項目及頻率	3-25
表 3-16 公路局自然邊坡特別檢測表	3-26
表 3-17 公路局各級邊坡不同災害情境處置方式	3-27
表 3-18 公路局 UAV、LiDAR 應用案例各分類適用性比較表	3-30
表 3-19 高速公路局邊坡分級制度	3-33
表 3-20 高速公路局邊坡各分級數量	3-33
表 3-21 高速公路局巡查頻率規定	3-34
表 3-22 高速公路局路塹邊坡檢查影響程度參考說明	3-35

表 3-23 高速公路局路堤邊坡檢查影響程度參考說明.....	3-37
表 3-24 高速公路局邊坡災害潛感因子評估參考表.....	3-38
表 3-25 高速公路局邊坡巡查結果初步分級.....	3-39
表 3-26 高速公路局監測頻率規定.....	3-40
表 3-27 高速公路局地錨功能評分表.....	3-40
表 3-28 高速公路局地錨檢測頻率規定.....	3-41
表 3-29 高速公路局邊坡總體檢成果分級.....	3-42
表 3-30 鐵公路邊坡養護單位之邊坡分級制度整理.....	3-42
表 4-1 物件偵測、語意分割和實例分割.....	4-2
表 4-2 RHRS 評估因子結合 AI 輔助分析.....	4-4
表 4-3 UAV 影像及加值產品結合 AI 應用邊坡場景之整理.....	4-6
表 4-4 GPT 模型各版本比較.....	4-15

第一章 緒論

1.1 研究動機

交通部運輸研究所(以下簡稱本所)配合交通部施政計畫之目標及策略，揭櫫創新應用智慧運輸科技，結合大數據分析、人工智慧(Artificial Intelligence, AI)、雲端等技術，改善道路壅塞問題、提升道路交通安全、加強安全示警以及推動前瞻智慧運輸技術研發和產業發展，以及運輸政策白皮書提出之「應用 AI、UAV 及遙測技術於鐵公路巡檢或監測」重點行動方案。

111-112 年辦理「多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探」自行研究計畫(2 年期)，探討多時期之多尺度空拍影像(如衛星、航照、UAV)結合深度學習技術於公路邊坡地貌變異判識之適用性及應用性，並已針對航遙測技術、空拍影像類別、資料前處理方法、人工智慧應用於影像辨識技術等完成初步探討。

113 年聚焦於利用 UAV 結合 AI 進行落石型邊坡破壞特徵影像辨識之探討，本所持續針對邊坡轄管相關單位之維護管理方法、災防機制及新興科技應用等，進行資料蒐集、專家學者諮詢和實務人員訪談工作，瞭解鐵公路邊坡之分級制度為巡檢作業基礎，亦為維護管理之關鍵，並完成研析 UAV 結合 AI 深度學習影像判識方法。

然而，AI 訓練需龐大的資料數量，方能達到較好之精度與成效，現今應用單位於邊坡維護管理與災防過程，已蒐集大量邊坡資料及相關數位圖資，已為未來結合 AI 應用立下良好基礎。爰此，本所配合前揭政策目標，以及過往研究基礎，於今(114)年度探討鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型輔助影像辨識、目標偵測及分類、圖資生成及量體分析等之可行性，藉以協助邊坡管理單位發想應用，俾提升巡檢量能及效能。

1.2 研究目的

本計畫研究目的係探討鐵公路邊坡巡查、檢測及監測，最後進行風險分級之過程，是否有 AI 切入應用之可行性，使 AI 能切合現行鐵公路邊坡維護管理機制與防災流程，並達成本所支援各運輸系統技術與研發創新之目標。

1.3 研究範圍及對象

本計畫研究範圍主要係鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之實務應用，俾提供維護管理與防災參用，研究對象為鐵公路邊坡相關轄管單位，包含：交通部公路局、高速公路局、國營臺灣鐵路股份有限公司、台灣高速鐵路股份有限公司及農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處。

1.4 研究內容及工作項目

本計畫以 1 年期程執行，期程自 114 年 1 月 1 日至 114 年 12 月 31 日止，共計 12 個月，研究內容及工作項目如下：

1. 蒐集國內外 AI 於邊坡之相關研究文獻

蒐集國內外各式 AI 模型於邊坡現況調查、檢監測、維護管理及防災應用之相關研究文獻和案例。

2. 專家學者諮詢及實務單位訪談

從政策面、管理面及執行面等角度，瞭解其對於 AI 支援邊坡分級制度和相關維護管理與防災流程專業見解。

3. 鐵公路邊坡分級制度探討及資料蒐集

探討國內外鐵公路邊坡分級制度探討及操作流程，並蒐整評估過程所需使用及產出之資料。

4. 分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

研析鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型輔助應用之情境、限制條件及適用性，提出實務應用建議。

第二章 文獻回顧

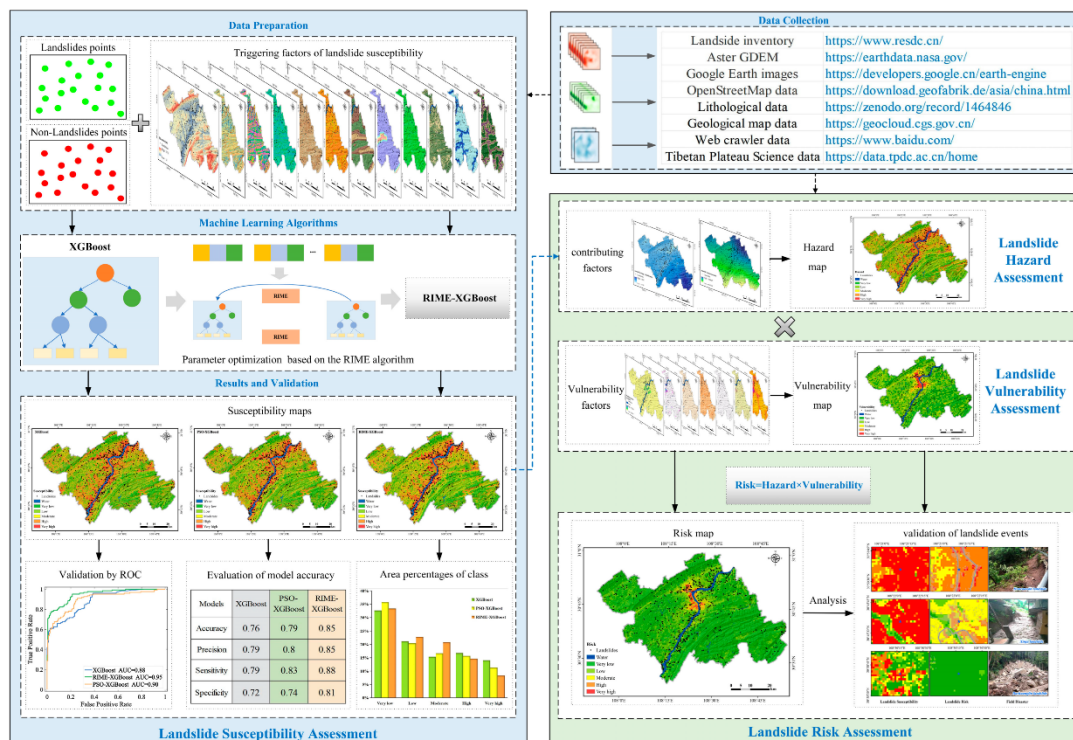
人工智慧(artificial intelligence, AI)一詞在 1956 年達特茅斯(Dartmouth)會議即被提出，人稱人工智慧之父約翰·麥卡錫(John McCarthy)定義：「The science and engineering of making intelligent machines, especially intelligent computer programs.」。簡言之，AI 即是利用人為編寫電腦程式，去模擬出人類智慧行為的過程。

過往邊坡巡檢及監測資料需耗費龐大人力來記錄和取得，並多為紙本表單紀錄，不易保存及應用，現今數位時代來臨，運算和儲存技術例如：雲端和地端伺服器、電池、散熱、無線傳輸以及圖形處理器(graphics processing unit, GPU)、邊緣運算等關鍵技術趨向成熟，AI 之各項應用已如雨後春筍般出現，讓現今許多資料可透過 AI 演算法訓練及學習，達到邊坡災害預測與風險管理等多樣化應用，轉變成對管理者、決策者有用之資訊。依文獻蒐集結果，邊坡結合 AI 應用場景主要可分為「邊坡滑動風險評估及災害預測」以及「邊坡劣化辨識及結構弱面分析」等兩類應用情境。

2.1 邊坡滑動風險評估及災害預測

Xin Dai 等 4 人(2025)^[1]提出一綜合性評估邊坡滑動風險之 AI 最佳化模型，該研究指出邊坡滑動分析方法，主要分為知識驅動(knowledge-driven)及數據驅動(data-driven)，前者係基於專家經驗主觀判斷，而後者則基於統計分析及 AI 機器學習如隨機森林(random forest, RF)、深度學習如卷積神經網路(convolutional neural network, CNN)等技術，由大規模數據資料中，歸納並揭示滑動發生時之潛在模式及關聯特徵。該研究彙整文獻及前人研究成果，選擇機器學習—極端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)做為基礎模型，並進一步採用最佳化演算法精進初始模型，以提升邊坡地滑評估效能、提高預測精度，並克服 XGBoost 在高維度特徵處理中容易出現之過度擬合(overfitting)問題。針對文獻資料和區域邊坡資料之可獲得性，該研究共選出 12 個邊坡滑動關鍵敏感性因子：(1)海拔、(2)坡度、(3)坡向、

(4)平面曲率;(5)剖面曲率、(6)地形濕度指數(topographic wetness index, TWI)、(7)岩性、(8)與斷層距離、(9)常態化差異植生指標(normalized difference vegetation index, NDVI)、(10)土地利用、(11)與河流距離、(12)與道路距離。該研究指出地滑好發於海拔 100 至 500 公尺、坡度 10° 至 25°、低平面曲率和剖面曲率處、NDVI 則為 0.85~0.95 區間，另距離河流越近，滑坡發生的機率越大，混合沉積岩和砂質碎屑是造成災害之主要岩性類型。綜整前項 12 個評估因子，對模型進行訓練和測試後，獲得邊坡敏感性風險評估地圖(如圖 2.1)，並將危險性評估結果分為極低、低、中、高和極高 5 個等級。後續再結合邊坡區域之人口、建物、道路等密度，做為社會脆弱性指標，綜合評估滑坡後帶來之風險。



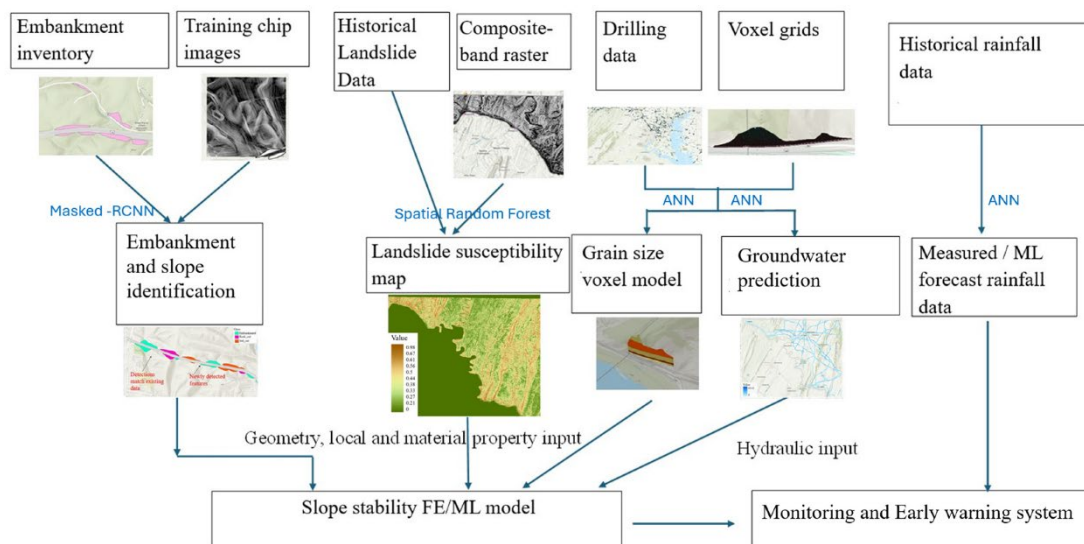
資料來源：Integrated Landslide Risk Assessment via a Landslide Susceptibility Model Based on Intelligent Optimization Algorithms.^[1]

圖 2.1 獲得邊坡敏感性風險評估地圖之研究流程

Xu & Zhang(2025)^[2]利用高解析度 LiDAR 產生之邊坡數位高程模型(digital elevation model, DEM)，蒐整相關資料(如擋土牆位置、歷史崩塌資料、鑽孔資料等)，再結合 AI 之隨機森林(RF)、人工神經網路(artificial neural network, ANN)和實例分割(instance segmentation)

技術，進行數位邊坡資產和邊坡穩定性模型之建立，將感測、資料預測與工程模擬進行串接，打造一高速公路邊坡數位孿生(digital twin)監測及風險預警系統，不僅提升邊坡穩定性之監測，亦能在大範圍環境中進行風險篩選。

數位孿生是將實體物件或系統，透過即時資訊、軟體分析與基於物理之建模相互結合，將實體轉化為虛擬，以實現雙向模擬和互動。考量數位孿生模型所需資料，首要需先透過 AI 建立數位邊坡資產清單，該研究採用 Masked-RCNN 模型之實例分割技術，以由 LiDAR 取得之 2 公尺解析度 DEM 資料進行學習訓練，旨在對三種不同類別：擋土牆、土質邊坡和岩石邊坡進行分類及範圍圈選，獲得包含幾何形狀和位置之三維數位資料，並達資料格式標準化和一致性；隨機森林演算法則被應用於預測山體滑坡發生機率，以歷史邊坡災害資料及 DEM 資料中獲得之地形和環境變數進行學習，並產生邊坡敏感高風險地圖；應用地下水、土壤類型及鑽孔相關資料輸入 ANN 模型，預測區域內公路網沿線 210 m 寬緩衝區之地下水深度，以供數位孿生模型用於邊坡穩定性分析，上開架構如圖 2.2。



資料來源：AI-Powered Digital Twin Technology for Highway System Slope Stability Risk Monitoring.^[2]

圖 2.2 基於 AI 之邊坡穩定性監測數位孿生系統架構

Menglin Kong 等 9 人(2023)^[3]為更為準確地預測邊坡地表位移，提出 VSXC-LSTM(VMD-SegSigmoid-XGBoost-ClusterLSTM)—深度學習時間序列預測框架，該研究將記錄邊坡地表相對位移(公厘)與時間(小時)監測儀器蒐集之原始數據，經前處理濾除雜訊後，先利用前揭框架之變分模態分解演算法(Variational Mode Decomposition, VMD)，功用係將前處理過之地表位移時間序列資料，分解為趨勢項 T(長期變化，如邊坡累積變位)、週期項 S(氣候、季節性因素造成之週期波動)和殘差項 R(無明顯規律之隨機波動與突變)，如公式(2-1)：

$$y_t = T_t + S_t + R_t + e_t \quad (2-1)$$

y_t ：原始位移序列

$T_t + S_t + R_t$ ：三個模態序列

e_t ：VMD 分解造成之誤差，但過程中已透過參數最佳化降至 min 值

接著再將各分項交由不同模型進行，趨勢項 T 交由 SegSigmoid (分段型邏輯回歸)模型處理，目的在於擬合位移趨勢並識別離群點與突變位置。此模型結合平滑趨勢擬合與異常點偵測功能，能處理滑坡位移中存在之突變行為與多階段變化特徵；週期項 S 經該研究分析，呈現 48 小時之週期性，顯示前兩日資料對當前變形具顯著影響，且假設 S 同時受趨勢項 T 等因素影響。此項使用梯度提升樹模型 XGBoost 建模，以擬合滑坡資料中具非線性與延遲依賴性之特徵，進一步提升地表位移預測之準確性與穩定性；殘差項 R 經檢定後確認仍具有時間依賴性，然而考量其變化尺度不一，該研究使用 ClusterLSTM 架構，先以聚類方式對分段序列進行分群，再針對各群訓練淺層長短期記憶網路(long short-term memory, LSTM)，以強化模型對殘差波動的預測能力，整理如表 2-1。

該研究後續透過模擬比較不同模型組合，證實提出框架之架構能顯著降低預測誤差，為邊坡滑移預警提供高精度方案，然亦指出由於土壤特性、結構、降雨和其他因素對土石流位移有顯著影響，將此單變量模型擴展為多變量預測模型，也是未來重要任務。

表 2-1 不同時間序列資料特性與模型選擇對照

時間序列	資料特性	模型名稱	模型選擇理由	處理目標
趨勢項 T	<ul style="list-style-type: none"> ●呈長期平滑上升趨勢 ●存在突變點或轉折點 ●非線性但具階段性規律 	SegSigmoid (分段式邏輯回歸)	可分段擬合多階段趨勢變化，並結合異常點偵測	擬合邊坡長期變形趨勢，並定位突變點與離群值
週期項 S	<ul style="list-style-type: none"> ●經分析具 2 日 (48 小時) 之週期性 ●受多變數延遲特徵影響 ●資料變化具非線性與延遲關聯 	XGBoost (梯度提升樹)	適合處理高維延遲特徵	擬合週期性波動模式，並捕捉歷史值對現值影響之延遲效果
殘差項 R	<ul style="list-style-type: none"> ●具不規則震盪 ●存在時間依賴性 ●子序列間尺度差異大，分布異質性強 	ClusterLSTM (聚類式長短期記憶網路)	使用聚類分群，解決不同尺度問題，且分群後訓練淺層 LSTM 對序列記憶敏感，能捕捉非顯著變化規律	提升模型對異質殘差序列之擬合能力，並改善傳統 LSTM 不穩定問題

資料來源：Landslide Surface Displacement Prediction Based on VSXC-LSTM Algorithm.^[3](本報告整理)

Lorenzo Nava 等 11 人(2023)^[4]同樣針對邊坡位移之預測，並比較 7 種深度學習模型，包含(1)多層感知器(multi-layer perceptron, MLP)、(2)LSTM、(3)門控循環單元(gated recurrent unit, GRU)、(4)單維卷積神經網路(1D convolutional neural network, 1D CNN)、(5)雙層 LSTM、(6)雙向 LSTM(bidirectional LSTM)、(7)卷積神經網路和 LSTM 之複合模型(Conv-LSTM)。以評估在不同邊坡情境下，前述各模型對於邊坡未來位移之預測能力。該研究以 4 處不同地理位置、地質環境之邊坡做為訓練及測試標的，以同時比較模型之適用性，分別為 2 處長期緩慢滑動之不穩定邊坡，經監測數據判斷，滑動主要受地層材料和降雨影響；2 處位於水庫區之側邊坡，其一受降雨與水庫水位調節影響，滑動模式呈現強烈週期性，而另一處地質條件較平緩，並無相關趨勢。其先蒐集目標邊坡之監測資料，主要使用不同天數之降雨量和變位數

據，再透過切分不同時間段，來使模型學習後進行預測，最後成果如表 2-2 所示。

表 2-2 各深度學習模型及表現比較

模型名稱	模型介紹	模型架構	表現說明	泛用性
MLP	多層前饋神經網路，結構簡單、訓練快速，但不具時序記憶能力	多層全連接層，無循環或卷積結構	所有案例表現穩定，高峰值和突變點預測準確，但在平緩(小波動)處稍微保守	高
LSTM	能記住時間序列中長期變化趨勢，適合處理非線性與長時序問題	包含輸入閘、遺忘閘與輸出閘，可擷取長期依賴特徵	所有案例中表現優異，能平穩預測小波動與遞增變形，具穩定性與解釋性	高
GRU	為 LSTM 簡化版本，參數更少、效率更高	僅含重設閘與更新閘，省略輸出閘	在多數案例中與 LSTM 表現相當，甚至於短期變化中更快速反應，然而在具週期性水庫邊坡上表現不佳	中
1D CNN	採用一維卷積結構，可擷取局部特徵	一維卷積層、池化層、全連接層組合	所有案例中表現最差，缺乏時序記憶能力導致長期趨勢預測不佳，僅擅長短區間趨勢	最差
雙層 LSTM (2xLSTM)	利用疊加兩層 LSTM，讓模型學到更深層次時間變化	為多層 LSTM 結構，前層輸出為後層之輸入	相較單層 LSTM 未明顯提升，甚至在資料不足時效果略為下滑	中
雙向 LSTM (Bi-LSTM)	雙向結構模型，同時分析資料前後變化，對整體時間序列有更完整的理解	前向 + 反向 LSTM 合併輸出	該研究僅採用單向歷史資料，雙向架構優勢無法發揮，表現不如單向 LSTM	中
Conv-LSTM	同時結合 CNN 提取特徵與 LSTM 時序建模	時序資料先經卷積層提取空間和時間特徵，再交由 LSTM 做序列預測	僅在具週期性水庫邊坡表現最佳，其餘案例不穩定，且訓練過程較為複雜	差

資料來源：Landslide Displacement Forecasting Using Deep Learning and Monitoring Data Across Selected Sites.^[4](本報告整理)

該研究結論建議，處理邊位移預測任務時可優先考量使用 MLP、GRU 和 LSTM，而在邊坡位移和季節性呈現關聯時，則考慮使用具卷積結構之複合模型(如 Conv-LSTM)，並提到複合式模型可以結合不同預測演算法的優勢，使模型能夠輸出更準確預測結果，對於邊坡預警系統之建立亦較有助益。

Yang Xiao 等 5 人(2023)^[5]蒐集目標邊坡 19 處 GPS 監測站之三維位移數據，經混沌性檢定後認為邊坡變位符合混沌特性(chaotic property)，屬看似隨機，實則由確定性規則所驅動之行為，故該研究使用混沌理論結合時間序列深度學習模型 LSTM，來進行變位預測，結論表明經混沌性處理後之資料，能讓 AI 模型預測得更為精準。

於資料前處理部分，該研究首先透過李亞普諾夫指數(Lyapunov exponent)檢驗滑坡位移時間序列之動態特性，當最大 Lyapunov 指數大於零時，代表系統對初始條件具高度敏感性，為混沌行為典型特徵之一，據此推論該變位資料具備非線性與潛在混沌性。接著，該研究利用相空間重構(phase space reconstruction)技術，分別對各維度變位資料進行重構，以觀察其於相空間中的軌跡行為，重構後之動態特徵亦進一步做為深度學習模型輸入資料之依據。

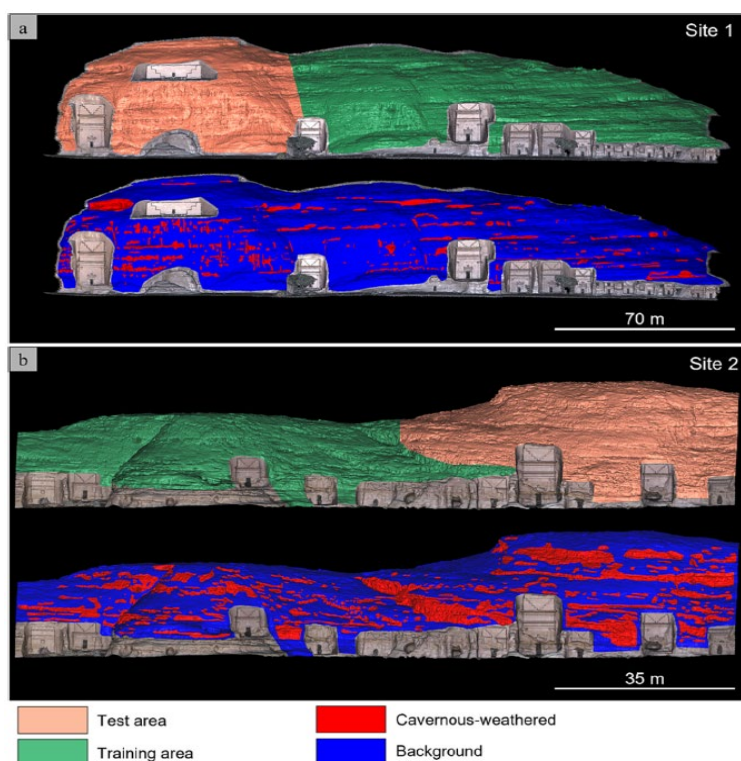
此外，在理想且無雜訊之資料蒐集環境下，均方誤差(Mean Squared Error, MSE)，如公式(2-2)，常被做為深度學習迴歸任務中預設之損失函數，然而，該研究表明蒐集之 GPS 監測數據中，小幅波動與突變性異常可能同時存在，若直接採用 MSE，容易因其對離群值高度敏感之特性，使模型過度擬合異常資料而影響整體預測表現。為此，選用 Pseudo-Huber 損失函數，如公式(2-3)，在兼具 MSE 之平滑性同時，亦能使模型對於資料中異常值、雜訊或不確定性因素維持穩定性。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2-2)$$

$$Pseudo - Huber = \vartheta^2 \left(\sqrt{1 + \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{\theta} \right)^2} - 1 \right) \quad (2-3)$$

2.2 邊坡劣化辨識及結構弱面分析

Tommaso Beni 等 9 人(2023)^[6]利用 UAV 近景攝影技術產製岩石邊坡 3D 點雲模型，並使用機器學習中的隨機森林(random forest, RF)演算法，量化岩坡海綿狀風化程度並預估強度。該研究主要分為三個流程：資料蒐集、機器學習以及海綿狀風化評估，在資料蒐集方面利用 UAV 取得欲分析之岩坡近 400 張影像，覆蓋率設定高於 80%，地面取樣距離(Ground Sample Distance, GSD)設定約 1-2 公分，無地面控制點，再透過 Pix4D 軟體將影像加以對齊、拼貼並獲得密集點雲模型，在機器學習前，該研究利用 CloudCompare 軟體進行海綿狀風化表面幾何特徵影像前處理工作，以利後續取得較好的訓練和測試精度，接著，其將海綿狀風化區域進行手動標註工作，並區分成訓練和測試資料集(如圖 2.3)，後交付 RF 進行分類。該研究在海綿狀風化評估及影響預測，則使用全域運動指數(Global Kinematic Index, GKI)來計算岩坡穩定性，加上開源之 SHAP 模組進行劣化區域可視化，標示出風化高潛勢區域。



資料來源：Classification of Rock Slope Cavernous Weathering on UAV Photogrammetric Point Clouds The example of Hegra(UNESCO World Heritage Site, Kingdom of Saudi Arabia).^[6]

圖 2.3 標註海綿狀風化區域並區分成訓練和測試資料集

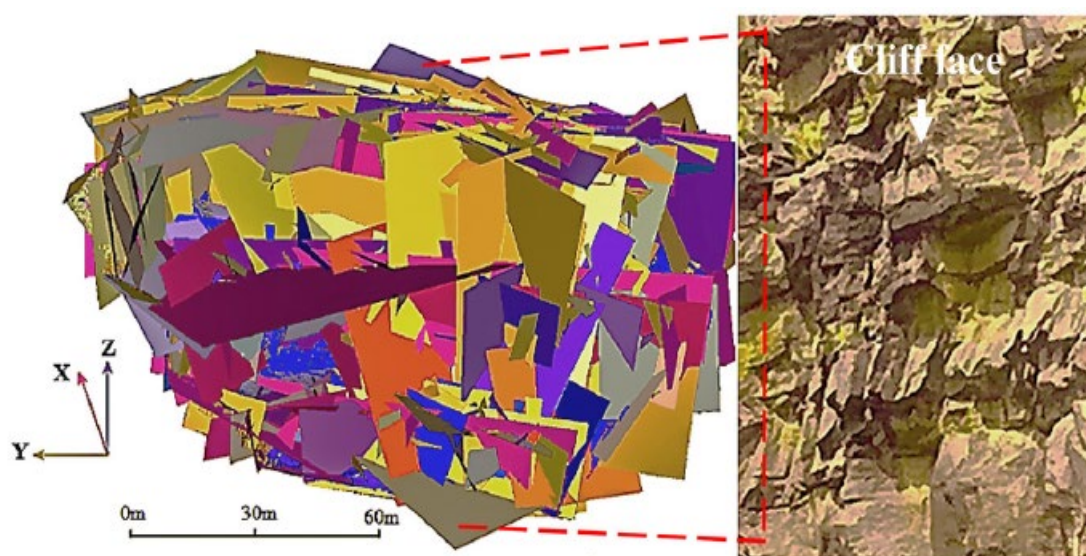
Shuhong Wang 等 4 人(2020)^[7]利用 UAV 蒐集岩石邊坡空拍影像，並製作多期 DEM，接著使用 Elman 神經網路模型結合人工魚群算法(Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA)，由歷史位移數據預測未來某一時間點或者時間段內關鍵測量點之位移，結果顯示，AFSA-Elman 在預測斜坡位移方面具有較好的精度和收斂性，是一種有效的位移預測工具。

該研究利用 UAV 航線設定及利用運動回復結構(Structure from Motion, SfM)—基於多視角及多張影像進行場景三維重建之技術，分析多個影像中的特徵點及其在不同影像中的位置變化來推算出這些點在三維空間中的位置，從而生成稀疏點雲，再利用多視角立體視覺算法(Patch-based Multi-view Stereo, PMVS)，從稀疏點雲中提取和匹配特徵點，進而生成高精度 3D 模型。3D 模型亦用於和設置於坡面上的光纖光柵位移傳感器所蒐集之變形數據進行比較，以驗證無人機技術在監測斜坡位移方面的效率。Elman 神經網路模型主要係用於預測關鍵測量點的位移，而為了精進 Elman 神經網路模型之權重和閾值，以便尋找最佳化的參數配置，該研究引入了 AFSA，結果顯示，使用該演算法能使原先模型誤差減少了 32%。

Shuhong Wang 等 4 人(2019)^[8]利用 UAV 進行高聳且陡峭(斜率約 89 度)的岩石邊坡進行拍攝，並進行影像處理和 3D 建模後分析其穩定性，實現一套由實地影像蒐集、處理，再到 3D 模擬和分析的完整流程。該研究首先以近景攝影取得目標邊坡高解析度影像，為保持影像品質，其律定飛航高度、速度以及相機光圈、曝光值等，並汰除模糊和重複影像後，進行進階束狀調整(Advanced Bundle Adjustment)，係以共線方程式描述物體空間點、影像上對應點及攝影中心之間的空間關係，據以將 UAV 取得之多張影像被統一到同一坐標系統中，使影像之間的匹配點實現進行精確定位，並獲取 3D 座標的一種方法。

該研究透過近景攝影測量所得座標與現場量測地面控制點座標之差值比較，藉以評估攝影測量結果的準確性，結果顯示，總體平均誤差小於 0.8%，爰此，該研究認定基於進階束狀調整，可實現高精度之 3D 模型。

接著，該研究利用 RANSAC 演算法，從點雲模型中識別出岩石邊坡結構面，此法能夠有效地識別出具有代表性結構面，該邊坡場址共識別出 491 個結構面(如圖 2.4)，進而對岩體進行更為精確之分析和模擬。在岩體穩定性分析上，則利用了自行開發之 GeoSMA-3D 軟體來進行，該軟體利用岩體傾角及方向，自行定義相關安全係數評估岩體是否滑移，並辨識出整體岩石坡中的關鍵岩塊(其失穩會造成局部或整體邊坡滑移)。



資料來源：Cliff Face Rock Slope Stability Analysis based on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry.^[8]

圖 2.4 利用 RANSAC 演算法識別模型結構面

Zhong Chen 等 5 人(2018)^[9]利用衛星(包含 GF-1、Landsat-8 及福衛 2 號)多時期邊坡空拍影像及數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，搭配 CNN 進行邊坡滑動區域判識。

該研究先透過衛星影像之紅外波段和可見光波段對地面反射率之間的差異評估指標，例如常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)來濾除植被；常態化差異水指標(Normalized Difference Water Index, NDWI)來濾除水體，並利用 PANTEX 指數濾除建築區域，突顯可能滑動之邊坡範圍(如圖 2.5)。

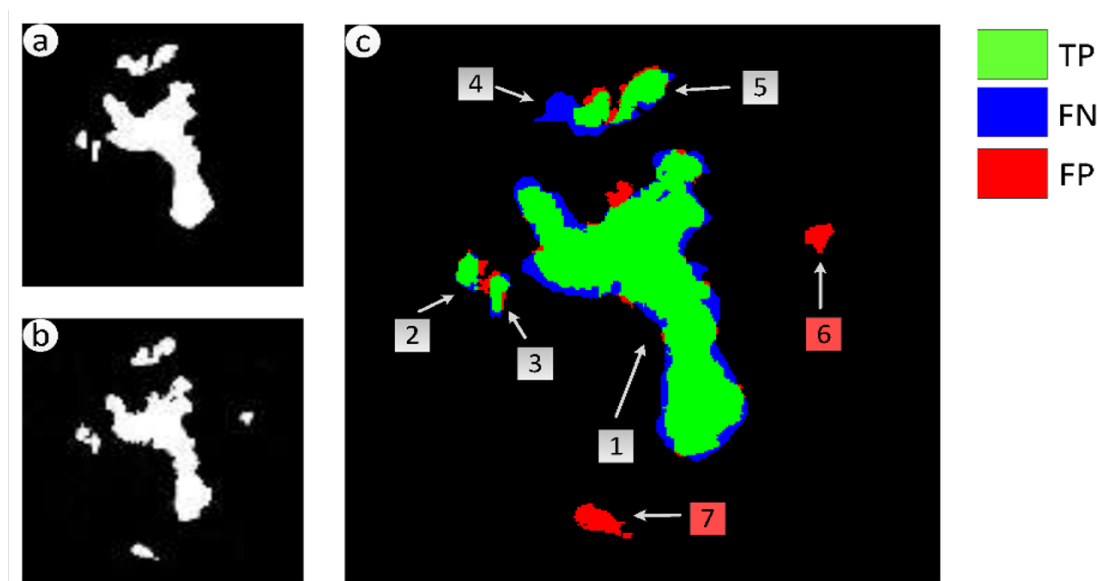
深度學習部分則使用深度 CNN 搭配可考慮空拍影像空間時序之空間—時間上下文學習(Spatial Temporal Context Learning, STCL)技

術，來進行特徵擷取及識別，結果顯示，其所提出的方法可使判識率達 70%以上(如圖 2.6)。



資料來源：Automated Landslides Detection for Mountain Cities Using Multi-Temporal Remote Sensing Imagery.^[9]

圖 2.5 透過不同差異評估指標處理衛星影像



(a)真實邊坡區域；(b)模型判識邊坡區域；(c)真實和判識區域相互套疊
(綠色=重合、藍色=真實有但無判識出來的區域、紅色=真實沒有的誤判區域)

資料來源：Automated Landslides Detection for Mountain Cities Using Multi-Temporal Remote Sensing Imagery.^[9]

圖 2.6 應用 AI 判識可能滑動邊坡範圍之結果

第三章 鐵公路邊坡維護管理機制與分級制度探討

3.1 鐵路邊坡維護管理機制與分級制度

依 113 年 12 月交通部頒布「鐵路邊坡維護與管理規範」^[10]，明訂鐵路機構(國營臺灣鐵路股份有限公司、台灣高速鐵路股份有限公司及農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處等 3 家，不包括「大眾捷運系統」)應於沿線邊坡辦理維護與管理作業，包括「邊坡維護管理分級」，以維邊坡穩定及行車安全，而鐵路機構亦須考量其轄管之鐵路特性及邊坡維護管理需求，編訂適用之鐵路邊坡養護制度、規章、專章或養護手冊。

前述規範揭示邊坡維護管理分級原則以邊坡單元為單位，並「依據觀測、檢查、檢測及監測等結果，並依路線與邊坡特性、潛在災損規模及安全性要求，評估維護與管理需求進行分級，並訂定各等級對應的觀測、檢查、檢測及監測作業規定。」，而鐵路機構亦得於各邊坡單元進行定期檢查、檢測作業後，配合對於關注範圍邊坡之觀測作業，以及邊坡穩定與行車安全監測成果，適時檢討之。

邊坡關注重點在是否出現土地利用變化、顯露地表位移或地盤變形特徵，甚至是發生崩塌裸露現象、邊坡大地工程設施是否有不穩定徵兆、邊坡穩定與行車安全防避災預(告)警設施變化量等，依照多層面資料綜合分析、研判，並可透過相關科技巡檢技術，例如利用 UAV 取得邊坡正射影像，或搭載空載光達測繪高精度地形，產製數值高程模型或數值地表模型。另規範說明鐵路機構應建立邊坡維護管理系統，用以建置邊坡相關基本資料及檢測與維護資料如下：

1. 邊坡位置

包括管理單位、鐵路路線、邊坡單元與對應的維護管理關注範圍、里程範圍、坐標或地點、邊坡等級等。

2. 地形、地質及水文條件

相關環境資料，包括坐標、高程、鄰近氣象站名、鄰近地震站

名、地形(主要坡向、坡形、坡度、區位)、邊坡地質條件(土岩層類別與分布、地質構造及不連續面特性等等)及邊坡水文條件(地面排水狀況、地下水位分布及集水面積範圍)等。

3. 歷史紀錄

除歷次檢查、檢測及監測報告外，歷次災害調查紀錄與相關資料，包括災害位置、災害時間、災害規模與類型、發生當時天候、災害前累積雨量、降雨延時、不同延時降雨強度、地震規模與震度、崩塌照片與描述、坡體位移情形、裂縫分布、可能原因(含可能滑動面)、災害照片與描述，及維護與災損修復照片等。

4. 工程資料

歷次工程地質調查報告、室內試驗及現地試驗結果、地形測量及設計計算書、施工階段竣工圖說、歷次養護的緊急搶修、修復或補強工程等設計與施工資料。

此外，需保存觀測、檢查、檢測、監測、修復與補強等各項作業紀錄，至少回溯至該邊坡前一次分級採用之資料，俾利研判該邊坡穩定狀態之變化。

3.1.1 國營臺灣鐵路股份有限公司

國營臺灣鐵路股份有限公司(簡稱臺鐵公司)核定頒布「鐵路邊坡養護手冊(最新修訂版本：112年7月)」^[11]，手冊定義之鐵路邊坡係指臺鐵公司轄管鐵路路權範圍內(或鐵路路權範圍外，然因鄰近軌道而可能影響軌道或列車行駛之邊坡)，由土壤或岩石等坡體材料構成之斜坡面，或經人為挖填整地，並於邊坡上構築必要大地工程設施之邊坡，包含自然邊坡、路塹邊坡及路堤邊坡。依規定，列管之鐵路邊坡需辦理相關巡查、地錨檢測、監測及安全評估等作業成果，依是否有不穩定徵兆、影響列車通行安全等情形分為A、B、C、D共4個等級(如表3-1)，並明列相關處置對策。其中，A、B級坡，應以密集或加強巡查、監測，及列車運行管理等作業，來維護列車與旅客之安全。

表 3-1 臺鐵公司邊坡定性分級制度

邊坡分級	狀況描述及處置作為
A	<ul style="list-style-type: none"> ● 邊坡有明顯不穩定徵兆，且可能影響列車通行 ● 需採取必要之維護、補強、整治或列車通行管理等緊急處理措施，並配合密切巡查及監測
B	<ul style="list-style-type: none"> ● 邊坡有疑似不穩定徵兆，且可能影響列車通行 ● 需採取必要之維護、補強或整治措施，並加強巡查及監測
C	<ul style="list-style-type: none"> ● 邊坡無明顯不穩定徵兆 ● 仍需進行巡查或例行性維護，並視需要進行監測
D	<ul style="list-style-type: none"> ● 邊坡處於穩定狀況 ● 仍需進行巡查 ● 或可解除列管，回歸各路線保養作業

資料來源：臺鐵公司鐵路邊坡養護手冊(112年7月修訂版)^[11]

臺鐵公司持續導入科技巡檢精進措施，利用數位圖資(包含:DEM、農林航測所之多期正射影像、Google Earth之多期衛星影像、地調所之環境地質資料、水保署之土石流潛勢溪流等)擴大調查範圍、判釋滑動潛勢、增加雨量滾動監測等策略，另配合「台灣岩體分類與隧道支撐系統(PCCR系統)」之岩類資料(如表3-2)，提高具災害潛勢邊坡之調查。

表 3-2 PCCR 各岩盤類別之劃分基準建議表

基本說明	「台灣岩體分類與隧道支撐系統(PCCR系統)」岩體分類法依據地質材料特性、岩體相關強度特性、岩體對水的敏感性，並參考岩層地質年代劃分岩盤為A、B、C、D四種類別。
岩盤類別	劃分基準
A 岩類	包括台灣地區所有的變質岩類及亞變質岩類、火成岩類中除火山角礫岩的岩層、沉積岩類中具高強度者。大致可以岩心單壓強度高於 25 MPa 為劃分參考基準。
B 岩類	泛指西部麓山帶西緣丘陵區沉積岩中，強度較低之已固結岩層。大致可以岩心單壓強度界於 5~25 MPa 為劃分參考基準。
C 岩類	包括中南部西部麓山帶晚上新統至更新統、東部海岸山脈帶膠結不佳之沉積岩或混同層。大致可以單壓強度小於 5MPa 為劃分參考基準。此外，亦涵蓋所有粗顆粒含量少於 50%，力學行為受控於細粒料之複合材料地層。
D 岩類	泛指粗顆粒含量超過 50%，膠結程度不拘之複合地質材料；包含一般所謂之礫石層岩體、火山角礫岩、火山集塊岩等等。弱面多寡以及含水量高低對於整個岩體強度所造成的影響程度大小，係隨個案而異。

資料來源：交通部公路工程施工規範 02403 章「岩體分類與開挖支撐類型」^[12]

此外，臺鐵公司利用「邊坡災害潛勢調查表」(如表 3-3)、「邊坡災害潛勢判識表」(如表 3-4)，進行邊坡災害潛勢評估(流程如圖 3.1)。

表 3-3 臺鐵公司邊坡災害潛勢調查表

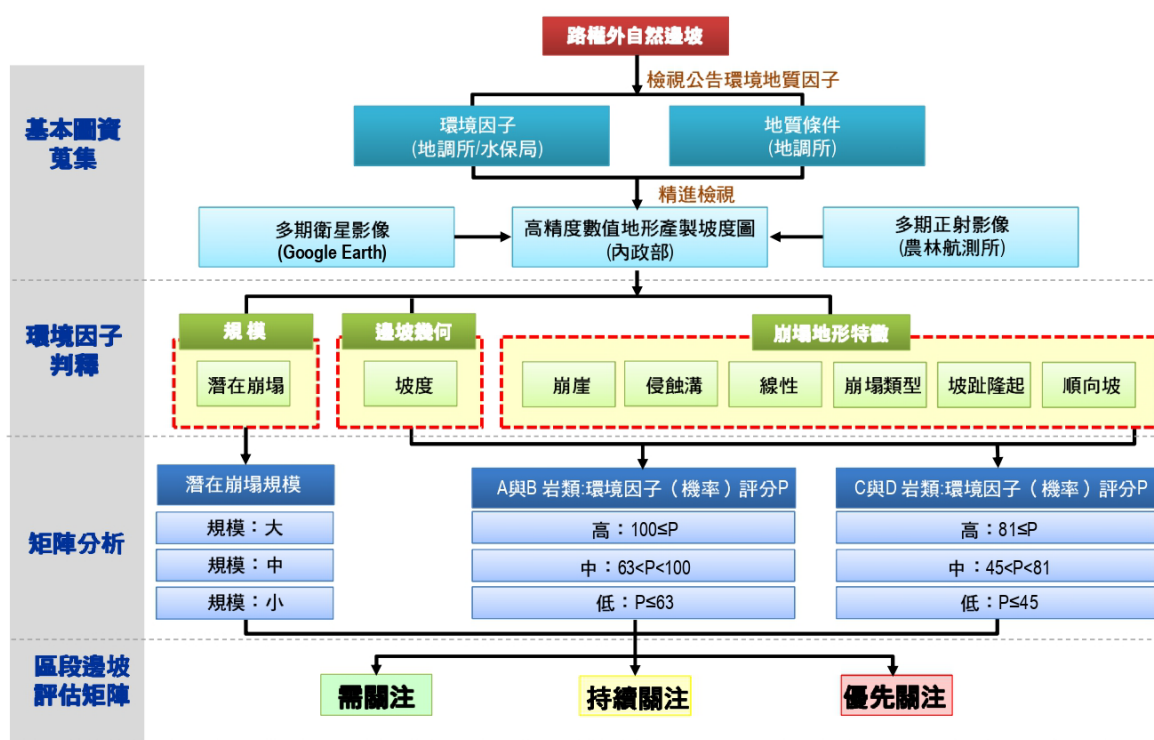
台鐵邊坡 路線里程	_____線	K____+_____	邊坡編碼		
危害評分因子		危害程度分級			調查 結果
潛在崩塌規模		小	中	大	
規模	潛在崩塌	無/有	有	有	
	坡長	< 15 m	15 m -60 m	≥ 60 m	
	坡高	< 7 m	7 m -21 m	≥ 21 m	
環境因子(機率)評分(P)		低(3分)	中(6分)	高(27分)	
邊坡幾何	坡度(自然邊坡)	< 20°	20° -50°	≥ 50°	
崩塌/ 地形特徵	崩崖 (成因/數量/分布)	無或數量少 影響程度低	數量多但規模小/ 主要分布於侵蝕 溝源頭 影響程度中	規模大/崩塌 事件造成(非 向源侵蝕) 影響程度高	
	侵蝕溝 (同坡向或小集水 區範圍)	無 發育密度低 影響程度低	發育密度中/部分 因向源侵蝕可能 導致岩屑崩滑 影響程度中	發育密度高/ 高潛勢土石流 溪流向源侵蝕 發達易導致岩 屑崩滑 影響程度高	
	線性 (多重山脊/陷溝/反 向坡/不連續面/斷 層/褶皺)	✓ 無 ✓ 有不連續 面但不發 達($J_n < 2$ 組)	✓ 無多重山脊或 陷溝及反向坡 ✓ 有不連續面但 不發達($2 \text{ 組} \leq$ $J_n < 4 \text{ 組}$) ✓ 有區域構造通 過	✓ 有多重山脊 或陷溝及反 向坡 ✓ 不連續面發 達($4 \text{ 組} \leq$ J_n) ✓ 有區域構造 通過	
	崩塌類型	無	岩屑崩滑/落石	岩體滑動	
	坡趾隆起 (隆起趾部與軌道 距離)	無/有 $100 \text{ m} \leq$ 距離	有 $10 \text{ m} \leq$ 距離<100 m	有 距離<10 m	
	順向坡 (各單位公開資料、 DEM 判釋)	否	是 (坡面與層面走向交角<20°，且傾 向一致者)		
	環境因子(機率)總分(P)				
地質狀況(含岩體)描述					
PCCR 岩體分類		<input type="checkbox"/> A 岩類 <input type="checkbox"/> B 岩類 <input type="checkbox"/> C 岩類 <input type="checkbox"/> D 岩類			

資料來源：臺鐵公司鐵路邊坡養護手冊(112 年 7 月修訂版)^[11](本報告調整)

表 3-4 臺鐵公司邊坡災害潛勢判識表

台鐵邊坡 路線里程	_____線 K _____ + _____	邊坡 編碼		邊坡潛勢 評估	<input type="checkbox"/> 高潛勢 <input type="checkbox"/> 中潛勢 <input type="checkbox"/> 低潛勢				
環境因子(機率)評分(P)		PCCR 岩體分類	<input type="checkbox"/> A 岩類 <input type="checkbox"/> B 岩類 <input type="checkbox"/> C 岩類 <input type="checkbox"/> D 岩類						
邊坡潛勢評估矩陣 (A 與 B 岩類)		潛在崩塌(規模)		邊坡潛勢評估矩陣 (C 與 D 岩類)		潛在崩塌(規模)			
		小	中	大			小	中	大
環境因子 (機率)P	低 ($63 \leq P$)	低潛 勢	低潛 勢	中潛 勢	環境因子 (機率)P	低 ($45 \leq P$)	低潛 勢	低潛 勢	中潛 勢
	中 ($63 < P < 100$)	低潛 勢	中潛 勢	高潛 勢		中 ($45 < P < 81$)	低潛 勢	中潛 勢	高潛 勢
	高 ($100 \leq P$)	中潛 勢	高潛 勢	高潛 勢		高 ($81 \leq P$)	中潛 勢	高潛 勢	高潛 勢

資料來源：臺鐵公司鐵路邊坡養護手冊(112年7月修訂版)^[11](本報告調整)



註：環境因子(機率)總評分P分級級距，需視PCCR岩類調整。

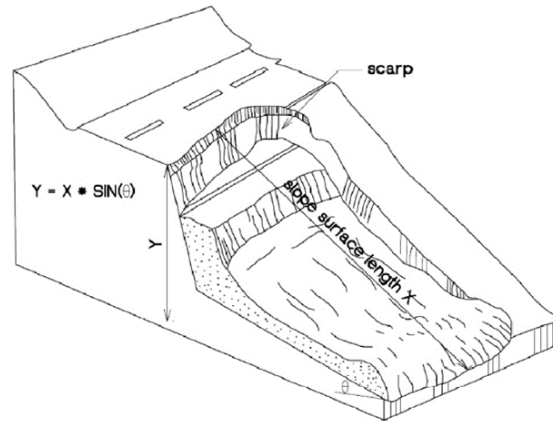
資料來源：臺鐵公司鐵路邊坡養護手冊(112年7月修訂版)^[11]

圖 3.1 臺鐵公司邊坡災害潛勢評估流程

針對邊坡潛在崩塌規模以及崩塌地形特徵，臺鐵公司「鐵路邊坡養護手冊」中亦有如下示意圖，協助人員瞭解各項名詞及判別標的。

1. 潛在崩塌規模

以坡頂冠部主崩崖為上界，趾部為下界，藉由高精度數值地形量測潛在崩塌範圍之坡長及坡高(如圖 3.2)。

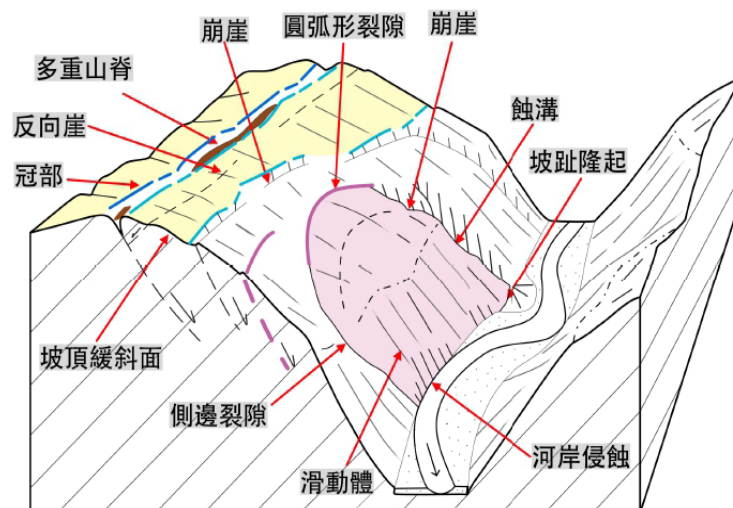


資料來源：臺鐵公司鐵路邊坡養護手冊(112年7月修訂版)^[11]

圖 3.2 邊坡災害潛勢判識之邊坡坡長示意圖

2. 崩塌地形特徵

包含崩崖、侵蝕溝、線性(綜合考量是否具有多重山脊、陷溝、反向坡等，以及檢視區域不連續面如層理、節理、劈理等弱面造成的短線性)、崩塌類型(較潛層的岩屑崩滑、落石，或岩體滑動或崩積層滑動)、坡趾隆起、順向坡等(如圖 3.3)。



資料來源：臺鐵公司鐵路邊坡養護手冊(112年7月修訂版)^[11]

圖 3.3 邊坡災害潛勢判識使用圖資

臺鐵公司因應邊坡遭逢天然災害或人為因素等，致使穩定性改變，邊坡分級需由專業廠商或工務段人員依現況勘查及專業判斷，適時滾動調整，依「鐵路邊坡養護手冊」說明邊坡分級調整時機如下：

1. 邊坡巡查作業完成後

巡查作業完成後，以巡查項目中與邊坡穩定性相關檢查項目，配合邊坡災害潛感因子評估(如表 3-5)，進行巡查初步分級，並分為 Ai、Bi、Ci 及 Di 級(如表 3-6)。巡查初步分級結果可做為各工務段維修、補強或整治工程或平時維護管理優先順序之參考。

表 3-5 臺鐵公司邊坡災害潛感因子評估參考表

項次	評估項目	評估標準		
		低	中	高
1	地質敏感區	(1) 無 (2) 地質遺跡地質敏感區 (3) 地下水補注地質敏感區	活動斷層地質敏感區	山崩與地滑地質敏感區
2	土石流潛勢區	無	中潛勢溪流經過 低潛勢溪流經過	高潛勢溪流經過
3	災害潛勢	低潛勢	中潛勢	高潛勢

資料來源：臺鐵公司鐵路邊坡養護手冊(112 年 7 月修訂版)^[11]

前述巡查初步分級，需再配合邊坡監測資料、地錨檢測資料、邊坡安全評估資料與邊坡風險規模評估(如表 3-7)，進行後續正式邊坡分級，並依規定頻率辦理邊坡巡查作業、邊坡監測作業或地錨檢測作業，定期檢討或追蹤相關補強或整治工程之進度，於相關補強或整治工程完成後，調降邊坡等級。

表 3-6 臺鐵公司巡查初步分級參考項目及評判標準

邊坡初步分級參考項目	邊坡初步分級	評判標準
<ul style="list-style-type: none"> ● 自然植生坡面 1. 邊坡坡頂裂縫或陷落 2. 坡趾龜裂或局部陷落隆起 3. 坡面鼓出、滑移、坍塌或崩落 4. 坡面侵蝕、沖刷、回填材料流失 5. 落石 6. 坡面異常滲水(如泥水或因受壓而異常噴濺之水) 	Ai	巡查初步分級參考項目之影響程度評估有 2 項以上為高，或邊坡災害潛感因子評估有 1 項以上為高時。
<ul style="list-style-type: none"> ● 坡體穩定或坡面保護設施 1. 護坡混凝土(噴凝土)裂縫、龜裂 2. 護坡設施變形、鼓出或凹陷 3. 砌石、蛇籠、箱籠、框條、格床、加勁擋土牆牆面破損、土石外露 4. 框梁、格梁周圍沖刷及淘空 5. 擋土設施沉陷、傾斜、移位或基礎淘空 6. 混凝土擋土牆材料劣化、剝落或其他異常 7. 鋼筋外露銹蝕 8. 設施接縫異樣、開裂分離或劣化 9. 設施表面異常滲水(如泥水或因受壓而異常噴濺之水) 	Bi	巡查初步分級參考項目之影響程度評估有 1 項以上為高，或 3 項以上為中時，或邊坡災害潛感因子評估有 1 項以上為中時。
<ul style="list-style-type: none"> 10. 地錨錨頭保護座(蓋)破損、掉落、鋼腱外露或防銹脂外洩 11. 地錨錨頭周圍沖蝕及淘空 12. 地錨錨承壓結構體破損掉落 ● 落石防治設施 1. 明隧道或落石防護棚/欄(柵)/牆沉陷、傾斜、移位或基礎淘空 2. 明隧道或落石防護棚/欄(柵)/牆結構凹陷或損壞 3. 明隧道、落石防護棚/欄(柵)/牆材料老劣化(裂縫、斷裂、腐蝕、損壞) 	Ci	巡查初步分級參考項目之影響程度評估皆為低，且邊坡災害潛感因子評估皆為低時。
<ul style="list-style-type: none"> 4. 落石防護網錨部鬆弛 5. 落石防護網破損、斷裂 ● 邊坡排水設施 1. 排水溝(井)銜接不良、中斷、斷裂、破損、變形 2. 排水溝(井)堵塞、淤積 3. 水平排水管、洩水孔堵塞或細粒料流失 4. 排水溝(井)外側或底部沖刷、下陷 5. 排水溝(井)混凝土裂縫、剝落、鋼筋外露銹蝕 	Di	非屬上述條件之邊坡。

資料來源：臺鐵公司鐵路邊坡養護手冊(112 年 7 月修訂版)^[11](本報告整理)

表 3-7 臺鐵公司邊坡風險規模評估參考表

評估項目	評估標準		
	低	中	高
邊坡風險規模	對列車、旅客等無影響	滑動體、掉落物影響範圍僅至鐵道旁邊溝或落石防治設施上，或路基流失影響範圍僅至鐵道旁邊溝，影響輕微	滑動體、掉落物或路基流失影響列車通行，對列車、旅客等影響性高

資料來源：臺鐵公司鐵路邊坡養護手冊(112年7月修訂版)^[11]

2. 邊坡監測作業完成後。
3. 地錨檢測完成後。
4. 邊坡維修、補強或整治工程完成後

列為 A、B 級之邊坡，於邊坡補強工程完工後，可適度調降等級。而針對無法補強或整治之 A、B 級邊坡，如因現地條件限制無法實施補強或整治工程時，應維持原邊坡等級，除依規定頻率辦理各項巡查、檢測及監測作業外，應進行邊坡防護工程或通知相關單位進行邊坡補強或整治工程，定期檢討與追蹤相關補強或整治工程之進度。此外，為降低邊坡災害風險，工務段應考量於颱風、豪雨期間或地震後以列車慢行或停駛等手段，來避免邊坡災害造成列車或旅客之損害，待特別檢測實施並確認安全後再通報列車復駛。

3.1.2 台灣高速鐵路股份有限公司

台灣高速鐵路股份有限公司(簡稱高鐵公司)於 110 年成立「高鐵邊坡安全總體檢專案小組」，透過執行「高鐵邊坡安全總體檢計畫」，持續盤點並維護邊坡安全，根據高鐵公司 113 年 8 月發行之「2023 永續報告書」^[13]，至 112 年年底完成《高鐵邊坡安全總體檢》共 389 處邊坡全面總體檢與改善工程。另為配合 113 年部頒規範，高鐵公司委託中華民國大地工程學會協助修訂「高鐵邊坡維護與管理手冊」，並已完成相關編修工作，據以實施路權外邊坡之觀測、檢查、檢測及監測等各項工作，並依對營運安全影響之嚴重程度共分 A、B、C、D 四個等級(如表 3-8)。

表 3-8 高鐵公司邊坡定性分級制度

邊坡分級	邊坡狀況	營運安全	應對行動
A	輕微不穩定	有影響	進行整治
B	疑似不穩定	可能有影響	加強監測 必要時整治
C		不造成影響	定期監測
D	穩定		

資料來源：高鐵公司網站(<https://www.thsrc.com.tw/>)

針對前述邊坡分級之實施流程，首先由高鐵公司人員進行邊坡現地踏勘，並依相關表單檢查項目以目視方式實施一般檢查，並針對影響程度低到高進行判別，再由結果進行初步分級：Ai、Bi、Ci 及 Di 級，若於一般檢查過程中發現有疑慮或無法判別之部分，則再利用相關儀器執行詳細檢查，此部分可能委由專業廠商協助進行。除進行邊坡及相關設施外觀之檢查外，高鐵公司有路權外邊坡之觀察，主要應用遙測技術進行，邊坡地錨之檢測、地滑計和傾斜管等儀器之監測等項目。透過前階工作項目成果，輔以邊坡安全評估與邊坡分級方法進行綜合評估後研判分級。

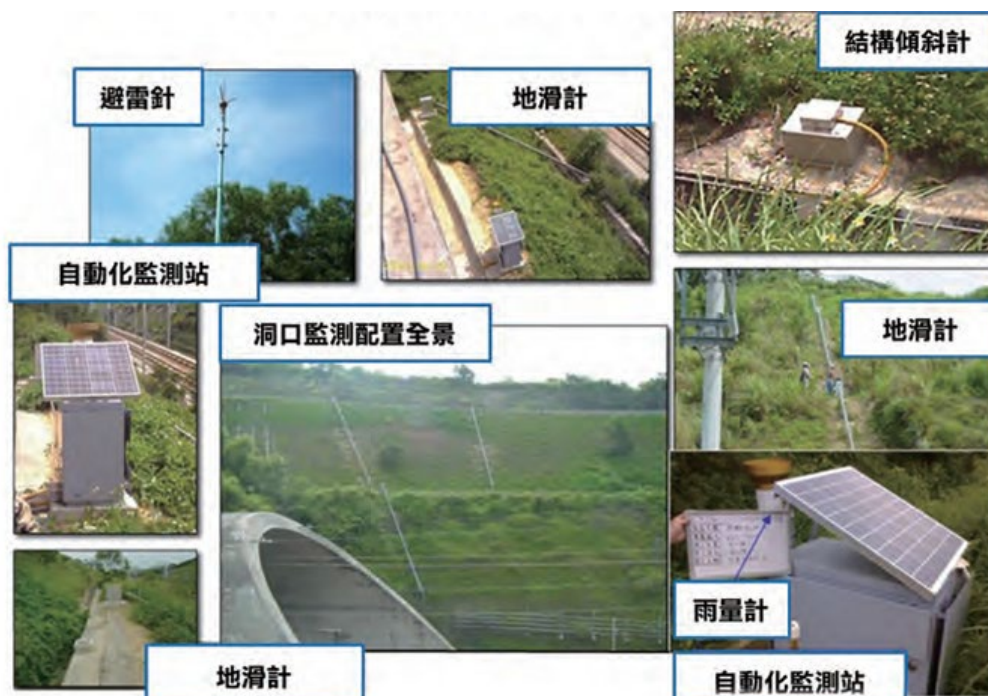
據了解，高鐵公司所轄邊坡皆為人工邊坡，破壞模式多係淺層坍塌，經由整治手段及施工補強後，目前(資料時間：114 年 7 月)已無 A 和 B 級之高風險邊坡。每年於颱風季節後(9 月至次年 3 月)，高鐵公司將派遣大地專業工程人員，以目視及步巡方式，依不同邊坡分級辦理不同頻率之檢查，D 級邊坡為 3 年/次、C 級邊坡(含)以上為 1 年/次，並據以滾動調整分級。

針對邊坡監測與災防部分，高鐵公司主要透過於目標邊坡和車行路線上設置「邊坡自動化監測系統」以及「天然災害告警系統(disaster warning system, DWS)」，以監控邊坡穩定度與預警。此外，高鐵公司亦逐年增加沿線 CCTV 之設置，以達遠端監看現地邊坡狀況，減少人員前往查看之人力及風險。

1. 邊坡自動化監測系統

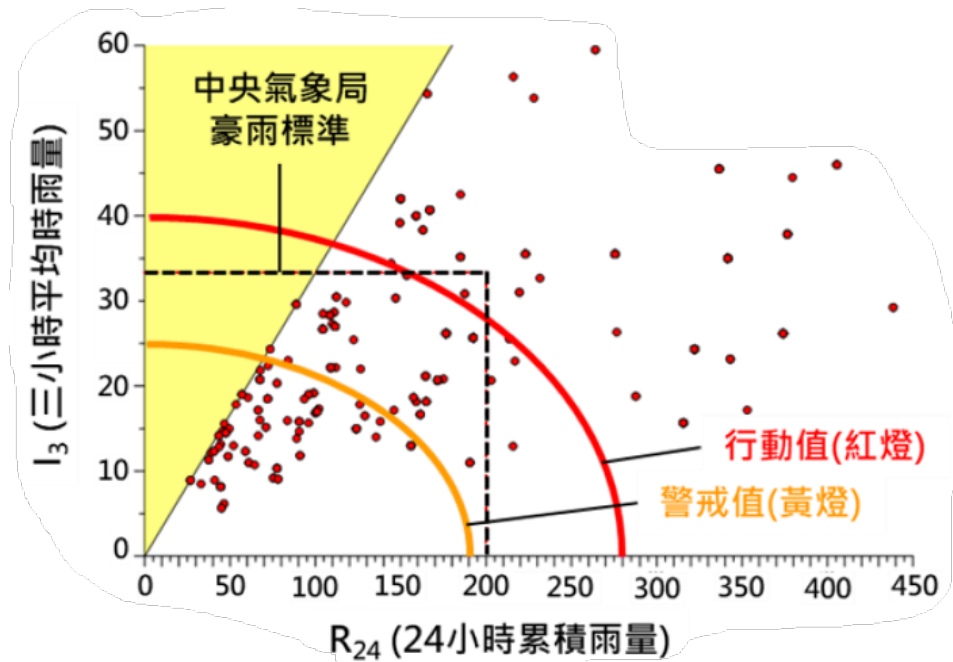
高鐵公司針對風險較高之邊坡設置自動化監測系統，主要以地滑計、地下水位計與 IOT 監測站(傾斜監測桿、土壤溼度計)等設備來進行邊坡位移相關數據回傳及蒐集(如圖 3.4)；風險較低之邊坡則採人工監測方式辦理。此外，高鐵公司彙整暴雨導致之邊坡災害事件、沿線地質特性資料、中央氣象署發布之降雨資訊，以及具代表性雨量站數據等，完成建置高鐵沿線邊坡暴雨預警系統。

在警戒值和行動值之指標選擇，以 3 小時平均時雨量為短期強降雨指標，24 小時累積雨量為長降雨延時指標(如圖 3.5)，當降雨紀錄點位(如圖 3.5 紅點部分，共 116 處)碰觸到黃色警戒值，表示該點位之降雨可能使邊坡接近不穩定狀態，而當降雨紀錄點位達到紅色行動值，表示該點位降雨量持續增加，可能有邊坡崩滑之虞，將啟動相應之應變作為。高鐵公司在比較各地質分區之雨場分布，其致災雨場之降雨特徵無顯著差異，因此高鐵全線採取共同之降雨警戒值。



資料來源：高鐵邊坡安全管理、監測與告警系統^[14]

圖 3.4 高鐵公司邊坡自動化監測系統



資料來源：台灣高鐵極端氣候下之天然災變預警機制^[15]

圖 3.5 高鐵公司降雨警戒指標

2. 天然災害告警系統(DWS)

高鐵公司在土建時期，已考量天然災害如：地震、颱風等對營運安全之影響，遂於隧道口上方、正線上方或鄰近正線之平面道路、敏感地質邊坡等高風險路段進行偵測器佈設(如圖 3.6)，高鐵全線 350 公里，已設置超過 300 個偵測器。



資料來源：高鐵邊坡安全管理、監測與告警系統^[14]

圖 3.6 DWS 偵測器

DWS 偵測依災害類型分成三大類：(1)地震偵測、(2)闖入偵測、(3)氣象偵測。當因地震、異物入侵、邊坡滑動、落石等，造成任一

位置斷線將作動告警並觸發「自動列車控制系統(automatic train control system, ATC)」發送逐級降速和停駛列車指令，並交由相關管理單位前往現場進行查看及災害排除。

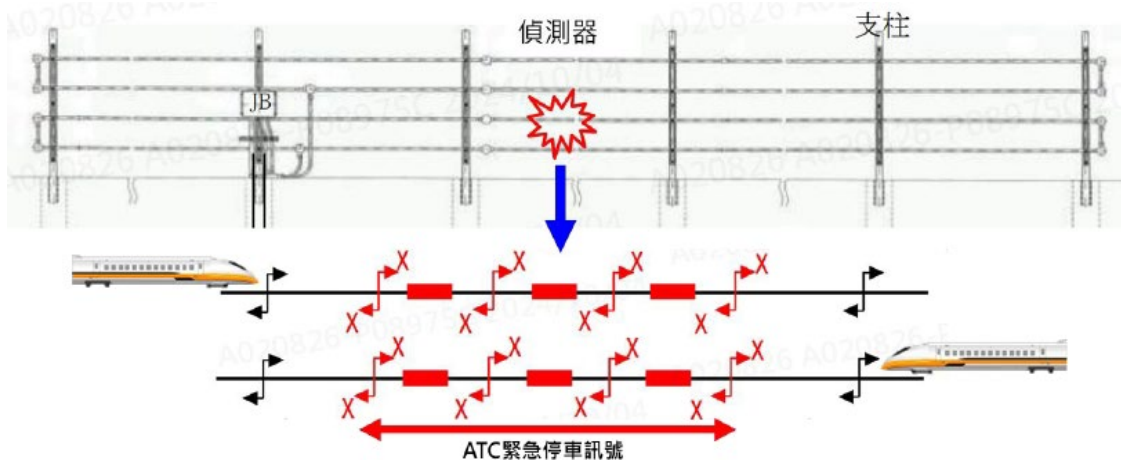
依高鐵網站揭露，於地震偵測部分，由主地震計(機械式和電子式)和副地震計(電子式)組成，計有 52 個，平均每 30 公里就有一個主地震計，主地震計之間隔約 5 公里，據高鐵公司內部風控規定，當主地震計偵測到震度超過 40 gal(cm/sec²)，約震度 4 級，將傳送訊號觸發 ATC，自動通知受地震影響路段之行駛中列車停車；超過 120 gal，約震度 5 弱級，則會觸發主變電站自動斷電。副地震計設置目的為記錄地震活動完整訊息，僅回傳震度數值，為行控中心安排各路段巡檢模式之參考^[13]。此外，高鐵公司依照地震震度，採取告警分級及訂定相應之應對措施(如表 3-9)。

表 3-9 高鐵公司地震告警分級及應對行動

等級	標準		應對行動
小型地震	40 gal 以下	無告警	正常營運
中型地震	40~79 gal 約震度 4 級	一級告警	確認設備正常後，以時速 70 公里以下復駛，經 3 階段(70→170→230)逐步提速後恢復正常運轉。
	80~119 gal 約震度 5 弱級	二級告警	以時速 45 公里以下復駛，經 5 階段(45→70→120→170→230)逐步提速後恢復正常運轉。提速至時速 170 公里以上時，須再執行「動搖測試」(測量高鐵列車級全線軌道行駛平穩度)。
大型地震	120~179 gal 約震度 5 強級	三級告警	以時速 45 公里以下復駛並逐步提速，同時進行「地面巡檢」。
	180 gal 以上		須先完成「地面巡檢」，才能以時速 45 公里以下復駛並逐步提速。

參考資料：本報告依高鐵公司網站(<https://www.thsrc.com.tw/>)整理

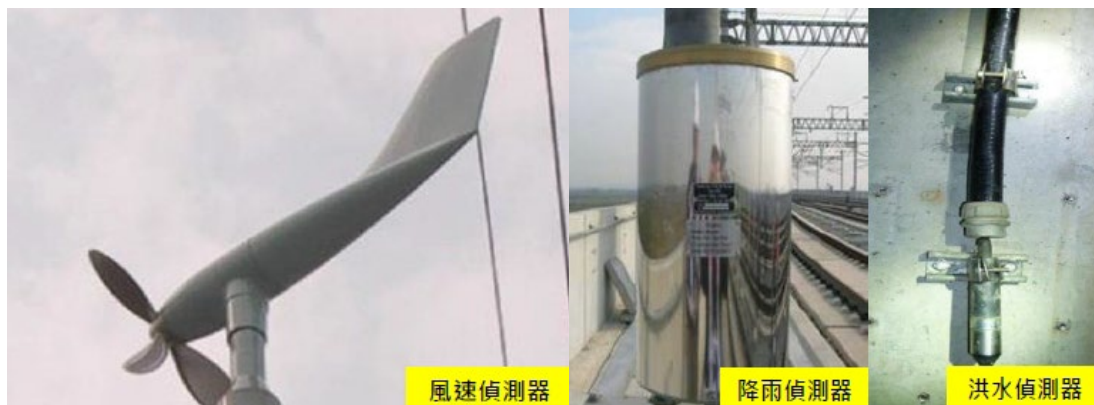
闖入偵測部分，於不穩定邊坡處設有滑動偵測器(67 個)與落石偵測器(84 個)，前者設置地點考量地質上可能滑動之位置、歷史災害區段以及高 25 公尺以上邊坡處，偵測器任一位置斷線將作動告警，此外，另增設傾斜感應器於支柱上，如果邊坡滑動傾斜超過 30 度亦將作動告警，觸發 ATC 發送受影響區域之停車訊號使列車停車(如圖 3.7)；後者則設置於地質上可能發生坍方之位置，例如：岩石節理或裂縫已暴露者，或其狀態不穩定，在地震後有崩落可能者，以及隧道洞口等地點。



資料來源：台灣高鐵極端氣候下之天然災變預警機制^[15]

圖 3.7 邊坡滑動偵測器作動示意圖

氣象偵測則設置雨量、水位、風速偵測計(如圖 3.8)，針對豪大雨、洪水及強風災害進行監測，當可能影響高鐵營運安全時，則依告警等級採取相應之應變措施。



資料來源：台灣高鐵極端氣候下之天然災變預警機制^[15]

圖 3.8 高鐵公司之風速、降雨和洪水偵測器

3.1.3 農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處

農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處(簡稱林鐵及文資處)轄管阿里山林業鐵路(簡稱阿里山林鐵),路線範圍主要位於嘉義市、嘉義縣及南投縣(如圖 3.9),於日治時期因林業資源採伐需求而開闢,目前運營路線主要分為阿里山林鐵主線(嘉義—阿里山,全長 71.6 km)以及祝山(阿里山—祝山,全長 6.3 km)、沼平(阿里山—沼平,全長 1.3 km)、神木(阿里山—神木,全長 1.7 km)3 條支線,並已於 113 年 7 月全線通車。

阿里山林鐵主線分為平地與山地兩線段,前者為嘉義至竹崎,後者為竹崎至阿里山線段,約 82%之路段屬於山地線,自海拔 30 公尺的嘉義,一路爬升至海拔 2,216 公尺高的阿里山(如圖 3.10),最大坡度達 62.5 ‰,全程經過 47 個隧道,沿途多坡且鄰近地區共計 5 條活動斷層,颱風、豪雨及強震等天然災害事件對阿里山林鐵所帶來影響甚大。

此外,根據農業部林業及自然保育署 114 年 5 月公告之「阿里山林業鐵路 114 年度安全管理報告」^[16]揭露,已完成阿里山林鐵全線評估調查,盤點危險因子較大之路段,設置邊坡監測、地震感測及雨量監測等感測系統,並全時進行路線地基監控,相關數據透過光纖網路回傳至行控中心統一監控,提供路線即時資訊,預計 115 年 7 月完成林鐵全線光纖佈設。

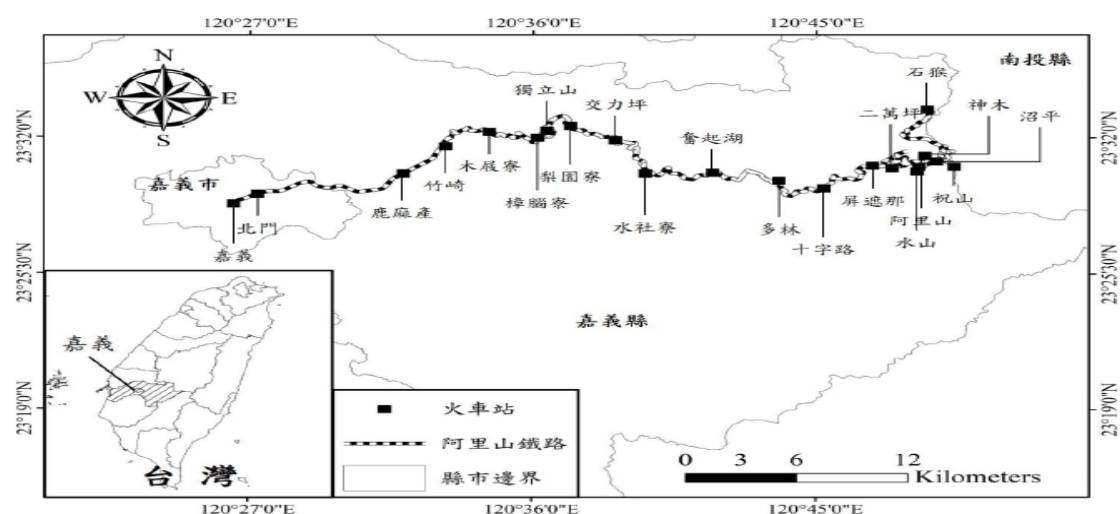
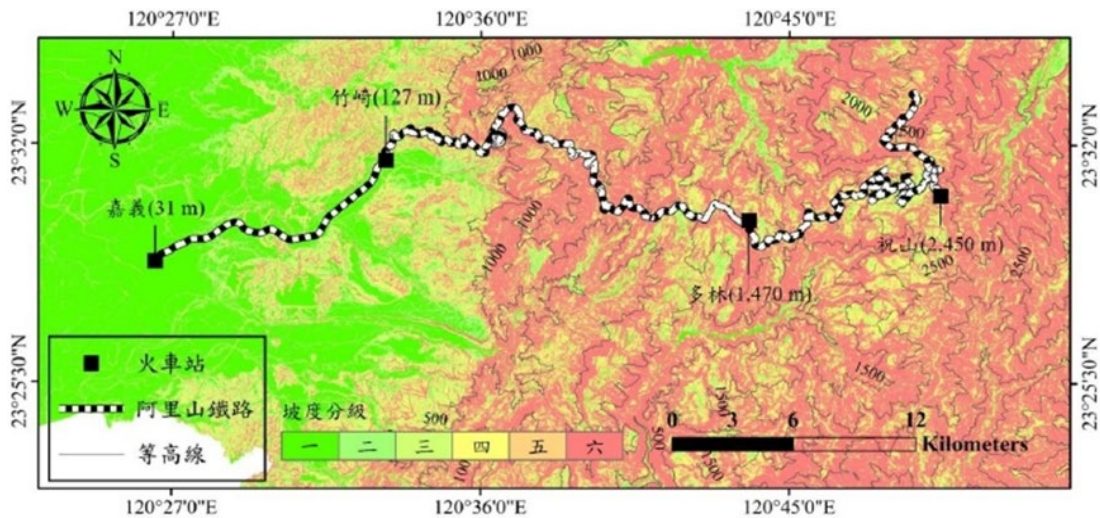


圖 3.9 阿里山林鐵地理位置及路線



資料來源：阿里山林業鐵路沿線樹木傾倒風險及邊坡土壤沖蝕之評估研究^[17]

圖 3.10 阿里山林鐵等高線及坡度

林鐵及文資處依據「交通部鐵路邊坡維護與管理規範」及參考相關單位現行邊坡養護手冊，例如：高速公路邊坡巡查、地錨檢測及儀器監測相關文獻，於考量阿里山林鐵營運路線特性與邊坡維護管理需求後，編訂「阿里山林業鐵路邊坡養護手冊」，並於 114 年 8 月完成初稿。

其手冊內規定之邊坡分級係先由人員現地巡查邊坡現況(坡面、穩定設施、攔石柵、排水設施、路基)及既有資料比對(坍滑或崩塌潛勢及活動性、監測結果、近 5 年內歷史災害、補強工程、影響範圍等)後，將各路段依風險等級由高至低分為 A、B、C、D 四個等級(如表 3-10)，後續依據新增災害與治理工程紀錄，每 2 年滾動調整邊坡風險分級。

表 3-10 阿里山林鐵邊坡定性分級制度

邊坡分級	狀況說明
A	有明顯不穩定或劣化情形且有影響行車之疑慮
B	疑似不穩定但並無立即影響行車安全之疑慮
C	未發現明顯不穩定且無行車安全疑慮
D	穩定狀況且無行車安全疑慮

資料來源：阿里山林業鐵路邊坡養護手冊^[18]

沿線邊坡之目視巡查包含對於自然邊坡、大地工程設施與監測設備等檢查項目，主要分成五大項，說明如下：

1. 坡面：坡面裂縫、鼓起、沖刷、滲水等現象。
2. 穩定設施：構造物裂縫、傾斜、鋼筋外露、基礎掏空、異常滲漏、錨頭異常…等現象。
3. 攔石設施：材料銹蝕、破損、彎曲、變形、支柱異常情況、落石堆積情形。
4. 排水設施：排水設施之斷裂、破損、堵塞、淤積、沖刷等現象。
5. 路基：道碴情況、噴泥現象、枕木、防落護欄劣化狀態。

林鐵及文資處統計轄管邊坡 399 處(包含主線 322 處、祝山線 6 處、眠月線 56 處及水山線 6 處，資料時間：114 年 8 月)，其邊坡劃分，以現場邊坡型式、地形、上下邊坡擋土型態、該路段鐵路線形及前後路段結構物(橋梁、隧道)為考量，每一檢查單元以路線線形、斷面種類及每段不超過 250m 為原則進行分段。

其邊坡分級計有：A 級 65 處、B 級 77 處、C 級 125 處、D 級 132 處。其中 A 級邊坡，再依照破壞類型、現況緊急程度、影響鐵路程度、路線線形與位置等，細分為 3 個順位(A-1、A-2、A-3)，並視破壞類型、預算分配、管理能量及改善順位排序，決定優先進行補強作業或施以監測系統等對應措施，分年分期改善。整理阿里山林鐵邊坡分級(含因應對策)如表 3-11。

表 3-11 阿里山林鐵邊坡定性分級意涵及因應對策

等級	分級意涵			因應對策	
				管理手段	工程改善
A 級	<u>有明顯不穩定或劣化情形且有影響行車之疑慮</u>	A-1	<ol style="list-style-type: none"> 1. 監測結果顯示滑動位置、趨勢明確者 2. 有大規模、中小型崩塌潛勢且巡檢發現土砂災害徵兆明顯 3. 每日車次頻率高，列為優先修繕路段 4. 車廂翻落風險高之路段 	建議 A 級邊坡於工程改善完成前，由維管單位加強巡查(如:朝巡、特別巡查等)，並觀察劣化狀況發展性，以利即時做出災害反應	應視破壞類型、預算分配、管理能量及改善順位排序優先進行補強作業或施以監測系統等對應措施
		A-2	<ol style="list-style-type: none"> 1. 位在彎道或隧道口附近，火車行駛時視線不良者 2. 有二次災害或邊坡土砂災害範圍擴大可能者 		
		A-3	<ol style="list-style-type: none"> 1. 既有擋土牆裂縫發展性待確認者 2. 坡長較短、土砂災害影響範圍較小者 		
B 級	<u>疑似不穩定但並無立即影響行車安全之疑慮或無開放通車者</u>			建議加強巡查，並視不穩定情況之發展性或林鐵政策調整，進行級別調整	X
C 級	<u>未明顯不穩定且無立即影響行車安全之疑慮</u>			建議進行例行性巡查或設施例行性維護	X
D 級	穩定狀況			進行日常巡查	X

資料來源：阿里山林業鐵路邊坡養護手冊^[18]

於邊坡地表(底)監測方面，林鐵及文資處於高風險邊坡處設置測傾管、水位(壓)井、沉陷點、傾度盤、地滑計、雨量筒、地錨荷重計及裂縫計等。其中，測傾管、沉陷點、傾度盤訂有監測管理值如表 3-12。未來俟全線基礎監測設施(如光纖)建置完成，即可應用監測數據進行趨勢預測與災害和邊坡破壞模式之建立，並發展預警與告警系統，提升車行安全。

表 3-12 阿里山林鐵邊坡監測儀器管理值及因應對策

管理值及 因應對策	注意值	警戒值	行動值
監測儀器	表示邊坡已略有不穩定之徵兆，密切注意其後續監測變化趨勢，是否有持續變位發展	表示邊坡已有不穩定之徵兆，需通知相關機關並更密集觀測與提升巡檢頻率監測	邊坡或擋土設施已發生位移或已瀕臨破壞，具明顯變位現象，須立即通知相關機關，如有破壞跡象應立即進行人員疏散
測傾管	5mm/月	10mm/月	>10mm/月
沉陷點	20mm	50mm	>50mm
傾度盤	412 秒(1/500)	573 秒(1/360)	825 秒(1/250)

資料來源：阿里山林業鐵路邊坡養護手冊^[18]

此外，林鐵及文資處亦應用遙測技術如：UAV、空載光達等，協助快速、安全獲取邊坡影像與三維地形資料，量測變形、偵測裂縫，並支援風險評估與預警管理。UAV 主要由巡查人員運用於快速現場巡查與地形拍攝，針對難以接近或危險的坡面，短時間內拍攝整個邊坡或工程區域的高解析度影像，減少人員現場巡查風險，並於強降雨或地震後，即時拍攝邊坡狀況，快速掌握潛在危險區域。空載光達等大範圍量測則視邊坡監測需要，委由專業廠商利用 LiDAR 獲取高密度點雲資料，生成精確數位地形模型，並可量測坡面高程、傾斜與曲率，提供邊坡變形分析基礎，並協助判斷潛在滑動面及高風險區域。

3.2 公路邊坡維護管理機制與分級制度

我國公路(省道及國道)邊坡維護管理機關為交通部公路局(簡稱公路局)及高速公路局，其皆遵循 104 年 12 月部頒之「公路邊坡大地工程設施維護與管理規範」^[19](最新修訂版本：111 年 4 月)辦理公路邊坡維護管理相關作業。該規範提供各級公路邊坡施行大地工程設施維護與管理作業之依循，以維持公路邊坡安全，並明訂各項邊坡巡查、檢測及監測辦理方法及邊坡評估分級。

公路邊坡巡查分為經常巡查、定期巡查及特別巡查等 3 類，主要以目視或輔以簡單器具進行，目的在於知曉邊坡及其大地工程設施

(坡面保護、坡體穩定、落石防治及排水設施等)現況，俾及早發現異狀，並研判可能發生之原因，若公路養護單位認為需進一步判別邊坡穩定狀態，以推行後續養護工作或實施緊急措施，則進行儀器之檢測及監測。規範明訂公路邊坡應依據巡查、檢測及監測等成果，評估維護管理作業需求進行分級，並可視邊坡類別及安全性要求，訂定各邊坡等級對應之巡查、檢測及監測作業規定，公路養護單位應依據邊坡等級採取對應之維護管理作為，並得適時調整邊坡分級。

另該規範揭隲公路主管機關或其指定之公路養護管理機關應考量其特殊需求，編訂適用之公路邊坡養護制度與養護手冊，其作業標準以不低於本規範規定為原則。

3.2.1 公路局

公路局負責省道養護工作，省道總里程長約 5,488 公里，其中山區公路約佔公路局總體養護路段約 20%，邊坡數量計有 1,700 餘處(資料時間：113 年 9 月)，故管理邊坡災害風險，保障用路人和車之生命財產安全，至關重要。公路局編訂「公路養護手冊(最新修訂版本：112 年 9 月)」^[20]，並實行邊坡定性分級制度，將邊坡依照是否具災害歷史、不穩定徵兆和護坡設施等因素，分成 A、B、C 及 D 共 4 個分級，然而，為因應部分復建完成邊坡仍具遠端致災因素，遂於 112 年 10 月 5 日增訂「邊坡區域外水因素及坡頂人為開發列為 C+級邊坡作業指引」^[21]，將邊坡定性分級修訂為 A、B、C+、C、D 共 5 個等級(如表 3-13)。

表 3-13 公路局邊坡定性分級制度

邊坡分級	2 年內 災害紀錄	5 年內 災害紀錄	護坡設施	不穩定徵兆
A	有		復(興)建中	明顯
B	有		無法設置	疑似
C+		有	復(興)建完成	疑似
C		有		無
D		無		無

備註：本表 C+級邊坡為參考交通部公路局「邊坡區域外水因素及坡頂人為開發列為 C+級邊坡作業指引」^[21]後整理納入本表。

公路局增加 C+邊坡分級目的在於避免部分邊坡雖經工程手段復(興)建完成，惟仍具備以下遠端致災因素導致可能之不穩定跡象：

1. 需持續關注之上/下邊坡

若邊坡經套繪位於「山崩與地滑地質敏感區」、農業部農村發展及水土保持署公布「土石流潛勢溪流」及「大規模崩塌」區域，檢視出現以下現象者。

- (1) 有明顯蝕溝發育；
- (2) 僅採低度復建工程之邊坡，如噴凝土(使用壽命僅約 4~5 年)；
- (3) 外在水因素，例如：坡面出水、縱橫溝排水不良。

2. 曲流/浪襲攻擊面邊坡

- (1) 歷史災情中，路基下邊坡曾受攻擊有坍滑等災害發生；
- (2) 曲流/浪襲攻擊面邊坡發生臨河(海)側下邊坡植被倒伏、邊坡裸露、既有護岸工基腳破壞或既有消波塊減損等現象。

3. 坡頂人為開發

- (1) 鄰近公路路權範圍內之邊坡，坡頂人為開發可能影響公路安全之虞；
- (2) 利用 UAV 巡檢(必要時以人工檢視)坡面已發生導排水異常、蝕溝發育、坡面裸露等破壞徵兆。

4. 明隧道上方邊坡

- (1) 明隧道設施結構破壞徵兆(如裂縫、漏水)；
- (2) 上方邊坡蝕溝發育，或岩石坡面已裸露且節理發達；
- (3) 上方邊坡土石堆積且外擴至明隧道範圍外。

公路局為掌握轄管邊坡之最新狀況，針對不同級別屬性之邊坡，採取不同管理方式，於 107 年推動「邊坡定性定量分級暨進階檢測圖資建置計畫」，以前揭邊坡定性分級 A、B、C+、C、D 為基礎，利用「落石災害評分系統(Rock-fall Hazard Rating System, RHRS)」，包含

以下 3 大因子，共 10 項評估因子：

1. 落石危害觸動條件因子：地形(A1)、地質(A2)、植被及水流狀況(A3)與氣候(B1)。
2. 行車安全風險因子：落石坍方歷史(C1)、規模尺寸(C2)、行車曝露度(C3)、緩衝腹地(C4)與聯外替代道路有無(C5)。
3. 殘餘風險因子：設置防護設施完成時間及驗證成效(D1)。

針對定性分級為 A、B 級之不穩定徵兆邊坡，並以式(3-1)計算邊坡危險度等級，並依總得分進行 1~5 級距(低風險到高風險)之細部定量評估，並明訂應用航拍技術輔助邊坡巡查(如表 3-14)。

$$\text{總得分} = [(A1 + A2 + A3) \times B1 + (C1 + C2 + C3 + C4 + C5)] \times D1 \quad (3-1)$$

表 3-14 公路局邊坡 RHRS 評估因子及危險度定量分級

評估因子		評估項目	評分準則				
			3 分	9 分	27 分	81 分	
道路現況	地形特徵 A1 [取平均]	坡高(m)	5-14	15-24	25-34	35↑	
		坡度(度)	40-49	50-59	60-69	70↑	
		坡型 [取最大值]			凹直形 凸嘴形	凸直形 凹窪形	
	地質狀況 A2 [取最大值]	岩性	結晶質	粗顆粒	泥岩石	斷層帶	
		不連續面	塊狀	節理發達	破碎、變形	崩積、開裂	
		順向坡	傾角≤坡度		未見砍腳，無差異侵蝕	未見砍腳，差異侵蝕	砍腳
			傾角>坡度		無差異侵蝕	差異侵蝕、層間無剪裂開裂	差異侵蝕、層間有剪裂開裂
	邊坡植被及水流狀況 A3 [取最大值]	植被面積(%)	80↑	79-30	29-10	10↓	
排水設施		截排水完整	截排水不完整或損壞	出現溝蝕、明顯沖刷	溝蝕已堆積落石		

行車 風險 評估	近 3 年平均落石坍方歷史 C1 [取最大值]	災害紀錄 (次/年)	1↓	2-3	4-6	6↑
		落石頻率	每季 1 次以下	高於每 季 1 次	高於每 月 1 次	高於每 週 1 次
	近 3 年落石尺寸及坍方規模 大小 C2 [取最大值]	坍方落石量(m ³)	200↓	200-499	500-999	1000↑
		落石尺寸(m)	0.2↓	0.2-0.6	0.6-2.0	2.0↑
	交通流量狀況 C3	日平均交通量 (PCU)	5000↓	5000- 9999	10000- 19999	20000↑
	道路寬度及腹地有無 C4 [取平均]	道路寬度(m)	9↑	9↑	9↓	9↓
		腹地有無	有	無	有	無
	區域聯外交通 影響 C5	風景遊憩區主 要道路	否	是	否	是
		替代道路	有	有	無	無
	加權乘子					
氣象加權 B1	前一年度連續 降雨月份單日 最高降雨量 (mm)	*1.0	*1.1	*1.2	*1.3	
		130↓	130-199	200-349	350↑	
現有防護設施加權 D1	防護設施成效	*0.7	*0.8	*0.9	*1.0	
		有 2 項防護設施且施作完成 5 年以上，成效驗證良好 (含預力地錨者於 1 年內已檢測過且有監控系統)	有 1 項防護設施效果佳或施作完成 2 年以上，成效驗證良好 (含預力地錨者於 2 年內已檢測過且有監控系統)	有防護設施但成效不佳或防護設施已施作完成尚未滿 2 年成效驗證 (含預力地錨者於 2 年內已檢測過但無監控系統)	無防護設施或防護措施無法消除致災成因 (含預力地錨者於 2 年內均未辦理檢測過)	

總分 = [(A1+A2+A3)xB1+(C1+C2+C3+C4+C5)]xD1						
總分級距	0~109	110~219	220~329	330~439	440 以上	
危險度等級	1	2	3	4	5	
危險度說明	低風險	中低風險	中風險	中高風險	高風險	
工具	以目力或輔以簡單器具	以目力或輔以簡單器具	以目力或輔以簡單器具	以目力或輔以簡單器具	以目力或輔以簡單器具	
			UAV (工務段自辦)	UAV (工務段自辦)	UAV (工務段自辦)	
				UAV、LiDAR或其他遙測科技設備判識技術(委外辦理)	UAV、LiDAR或其他遙測科技設備判識技術(委外辦理)	
項目	邊坡外觀及人工設施檢視					
	—	—	邊坡外觀空拍巡檢			
			邊坡分級調整建議			
			—	變異性分析(以 3D 數值模型比對)		
				浮、落石分析(以 3D 點雲圖檢視)		
張力裂縫發現或檢視						
綜合評估建議(含後續關注異狀項目、後續維護、補強與整治工法)						
頻率	以目力或輔以簡單器具： <u>1 次/年</u>					
	—	—	UAV(工務段自辦)： <u>1 次/季</u>			
			UAV、LiDAR 或其他遙測科技設備判識技術(委外辦理)： <u>每次汛期前至少 1 次</u> *若評為危險度 5 之邊坡需要於 10 月前加辦 1 次			

定量評估後再依其危害度等級的不同，將中高風險等級(4、5級)歸類為「優先關注邊坡」，依公路局官網揭露優先關注邊坡路段共有61處(資料時間：114年8月)。

針對公路局邊坡巡查頻率規定，日間經常巡查頻率為1次/週，下邊坡則為1次/季，需由人員特別關注事項為：(1)路面塌陷損壞、崩落、(2)上邊坡落石或崩落、(3)下邊坡滑動或掏空(整理如表3-15)。針對天災來襲，公路局依規定辦理特別巡查，在颱風來臨前後、豪雨、洪水、地震震度達5弱以上之震區需立即巡查邊坡，另震度4級則立即巡查震區內之優先關注邊坡，辦理方法和巡查項目同經常巡查。

表 3-15 公路局邊坡(含相關設施)巡查項目及頻率

公路編號： _____ 日期： _____ 年 _____ 月 _____ 日 天氣狀況(晴/陰/雨)： _____

巡查單位： _____		巡查類別： <input type="checkbox"/> 日間經常 <input type="checkbox"/> 特別		
主分類	次分類	巡查項目	巡查頻率	
			經常	特別
路基及邊坡	自然邊坡	1. 路面塌陷損壞、崩落 2. 上邊坡落石或崩落 3. 下邊坡滑動或掏空	1次/週， 下邊坡1次/季	必要時 (優先關注邊坡)
	柔性護坡		1次/週	必要時
	剛性護坡		1次/週	必要時
	擋土牆		1次/週	必要時
排水設施	邊坡排水	雜草阻礙水路暢流	1次/週	必要時

資料來源：公路養護手冊^[20](本報告整理)

檢測方面，公路局實施邊坡定期檢測，頻率為1年/次，對設有擋土構造物(例如：防石柵、石(箱)籠護坡、噴凝土護坡、混凝土格框或格子梁護坡、岩(地)錨(格梁)護坡、混凝土擋土牆、預力地錨鋼筋混凝土(或排樁)擋土牆、加勁擋土牆等)之邊坡，以目力或輔以簡易器具實施，並紀錄異狀、損傷。檢測目的為發現邊坡滑動之跡象及擋土結構物是否降低結構功能，俾提供邊坡狀況資訊，採取限制車輛通行或封閉交通等管制措施。由天災或人為因素(如火災、填土、開墾破壞)引起之災害，如認有必要時即進行特別檢測。針對自然邊坡之特別檢測，應檢查是否有崩落、裂縫、鼓出、坍塌、湧水、植生異常、鬆動浮石、滾石、坡頂與坡面截水、排水設施、非法佔有等項目(如表3-16)。

表 3-16 公路局自然邊坡特別檢測表

公路編號： 日期： 年 月 日 天氣狀況(晴/陰/雨)：

養護單位								
檢查位置		縣(市) 鄉(鎮區)		里 程		<input type="checkbox"/> 北下(西向)、 <input type="checkbox"/> 南上(東向)		
現場 狀況	地質狀況	<input type="checkbox"/> 土層邊坡 <input type="checkbox"/> 岩層邊坡 <input type="checkbox"/> 礫石層邊坡 <input type="checkbox"/> 其他地質，說明：						
	邊坡形狀	坡高	公尺		坡度(坡距比)	邊坡面寬	公尺	
	地下水狀況	排水	<input type="checkbox"/> 乾燥 <input type="checkbox"/> 濕潤	湧水位置		湧水量	約 公升/分	
		湧水	<input type="checkbox"/> 表面水 <input type="checkbox"/> 湧水	湧水之地質狀況		調查時間	月	降雨後 日
排(洩)水管		<input type="checkbox"/> 正常 <input type="checkbox"/> 阻塞						
監測系統		<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有，項目說明：						
監測情形		<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有： <input type="checkbox"/> 自行量測 <input type="checkbox"/> 委外量測			監測頻率 <input type="checkbox"/> 每月 <input type="checkbox"/> 每季 <input type="checkbox"/> 每半年 <input type="checkbox"/> 每年 <input type="checkbox"/> 其他			
災害歷史		以往災害 <input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有		鄰近災害		<input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> 有，說明：		
邊坡類別	檢查項目	養護措施			檢查結果	處理情形	注意事項	
植 生 邊 坡	1.崩落	清除崩塌土石					一、檢查結果應記錄(正常)(○)、(異常)(×)、(無此項)(/);發現異常情形，應於備註欄註記。 二、設施異常時，應即設法處理，或將檢查表簽請核辦。	
	2.裂縫、鼓出、坍塌	坡面整平及裂縫填補，以防雨水入滲						
	3.表土剝落、雨蝕溝	檢查坡面風化程度、侵蝕狀況，並將坡面整平、加強植生，另應檢查坡面周圍排水設施之排水情形，必要時改善或加設截、排水設施						
	4.平臺上堆積物	清除堆積物						
	5.湧水	檢查湧水之水質，改善或加設截、排水設施						
	6.樹木傾倒、雜草異常茂盛	清除傾木及雜草，以免影響行車安全視距						
	7.植生枯損	再植生、追肥或使用其他方法外，對植生被覆狀況應充分掌握						
	8.行車目視可及範圍內垃圾堆積	清除						
	9.鬆動浮石、滾石	挖除浮石、滾石，並依邊坡現況設置落石防護設施						
	10.坡頂與坡面截水、排水設施	裂縫修補、截排水設施破壞修復、淤塞清除						
	11.非法耕作及佔有	予以制止、排除及復舊						
備註	人工可及，以人工檢測為原則；人工不可及，以其它科技方法(如 UAV)代替。							
檢測人員：				單位主管：				

資料來源：公路養護手冊^[20]

公路局亦訂定於現行邊坡分級管理制度下，遇各災害情境相對應之邊坡分級應辦巡查或檢測事項，亦包含於災後取得空中或衛星影像等作為(如表 3-17)。

表 3-17 公路局各級邊坡不同災害情境處置方式

各情境之處置方式	A	B	C+	C	D	大型地滑、順向坡
3 小時累積雨量達 120mm 以上	1	1	1	1	1	1
前期(48 小時)累積雨量達 350mm 以上	2	1	-	-	-	2
海上颱風警報解除後	1	1	1	1	1	1
震度 6 弱級以上區域	3	3	3	3	1	2
無預警大規模坍方搶通後	4	4	4	4	4	4
臨河側上游發布土石流紅色警戒	1	1	1	1	1	1

處置 1：2 日內實施特別巡查、

處置 2：14 日內完成特別檢測、

處置 3：(1)7 日內完成特別檢測、(2)實施朝巡 1 週、(3)取得空中或衛星影像、

處置 4：(1)實施朝巡、暮巡 1 週、(2)取得空中或衛星影像、

備註：無預警大規模坍方 5000M³~20000M³ 者，執行處置 4 之(1)。

若該邊坡曾出現無預警大規模坍方 5000M³ 者，其各情境之處置方式比照上表 A 級邊坡之處置方式。

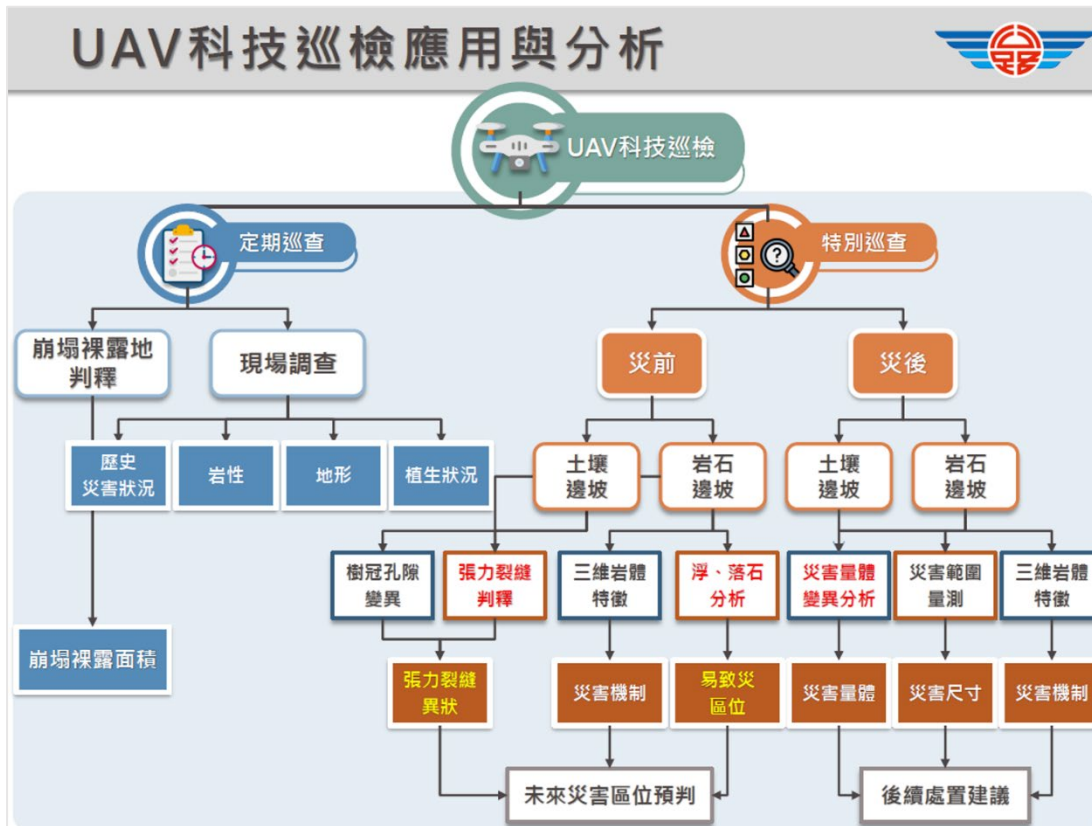
資料來源：省報橋梁、邊坡安全管理與防災(含 0403 震後檢測)^[22]

由前揭公路局邊坡定量分級制度知悉其優先關注邊坡已持續導入 UAV、LiDAR 和 InSAR 等科技應用，針對易致災邊坡進行災害潛勢調查，蒐集邊坡空拍影像及產製相關數位模型，並於建置數位化圖資檔案後，經由圖資套疊或模型檢視，對症下藥，增進科技防災及邊坡治理效能。以下針對公路局運用遙測技術於邊坡之情形及實際案例進行介紹。

1. UAV

公路局應用 UAV 進行科技巡檢已行之有年，為配合邊坡維護管理需求，公路局鼓勵邊坡巡檢人員取得證照成為操作飛手，取得證照者已超過 70 人。並採購 UAV 及相關硬體設備，平時則利用 UAV 進行各項現場調查，包含：植生狀況、浮落石位置、張力裂縫等，再利用飛航規劃及定時拍照功能，拍攝連續且重疊之影像，以

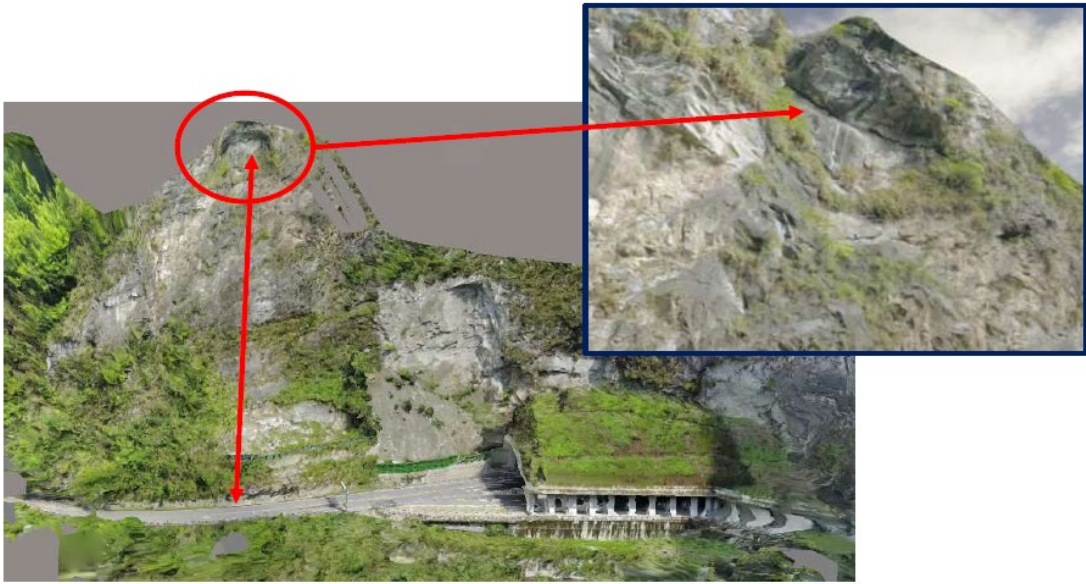
進行點雲模型重建應用，災後亦能迅速取得邊坡災害影像，分析災害量體並支援各項決策(如圖 3.11)。



資料來源：公路總局邊坡維護管理制度^[23]

圖 3.11 公路局 UAV 科技巡檢應用與分析

108 年 4 月 20 日台 8 線 176k 九曲洞路段落石砸傷遊覽車乘客後，公路局即應用 UAV 無人機空拍建模找出落石來源(如圖 3.12)。113 年 4 月 3 日花蓮地震後台 8 線(花蓮天祥以東 167K~185K)及台 9 線(蘇花 143K~164K)出現邊坡災害，公路局依地震災害情境辦理震度 6 弱級以上區域邊坡特別檢測及 UAV 空拍，於台 9 線和平至崇德路段，完成 22 處邊坡特別檢測，辦理計 12 次 UAV 空拍建模工作，其中台 9 線 158.3K 處邊坡，於震後產生高達 700 公尺以上之蝕溝(如圖 3.13)，已非一般人力目視可及，即能利用 UAV 配合規定之巡檢頻率和項目，持續關注。



資料來源：無人機於防災之應用分享與 AI 應用之展望^[24]

圖 3.12 運用 UAV 於台 8 線 176k 九曲洞路段找出落石來源

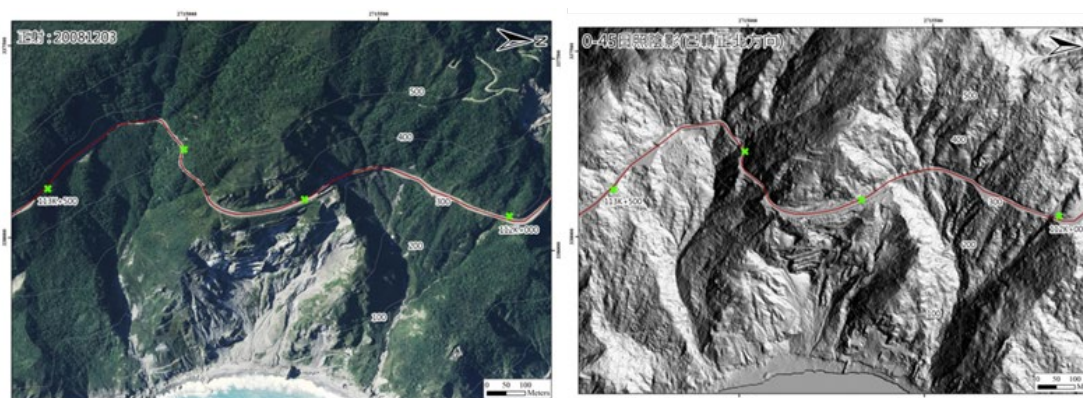


資料來源：省報橋梁、邊坡安全管理與防災(含 0403 震後檢測)^[22]

圖 3.13 台 9 線 158.3K 邊坡於 0403 地震後之災害

2. LiDAR

一般 UAV 主要搭配光學鏡頭，應用於邊坡表面可視徵象調查，例如：張力裂縫、倒懸孤石……等等，可良好克服人力不易抵達巡檢及目視角度受限之情形，惟較適用於裸露邊坡，而在地表覆蓋植被下的邊坡狀態，則需搭配空載光學雷達(LiDAR)來進行，藉由 LiDAR 產製數值高程模型，以獲取地表高程變化和更細緻的災害特徵。例如：公路局於蘇花公路應用 UAV 搭載 LiDAR 建立沿線正射影像及 3D 數值地表模型(如圖 3.14)。目前公路局應用 UAV 或 LiDAR 主要進行之應用類型、優點和適用條件，如表 3-18。



資料來源：科技技術應用於山區公路養護管理總結報告^[25]

圖 3.14 公路局使用 UAV 搭載 LiDAR 建立邊坡 DEM

表 3-18 公路局 UAV、LiDAR 應用案例各分類適用性比較表

類型	說明	條件	設備
地表微變量測	由地表凹陷或隆起變化快速鎖定落石區域	需有前期 DSM	UAV
裂縫調查	坡頂裂縫檢視	裸露無植被邊坡	UAV
浮石巡檢	進行 360 度環景巡檢	裸露無植被邊坡	UAV
落石危害度分析	藉由 DEM 特徵判識落石點	須先濾除植被	UAV、LiDAR
維生路線航攝與勘災	可事前規劃航線座標，於災後自動來回航攝災況	天氣狀況較為良好時(風速低、能見度優良)	UAV

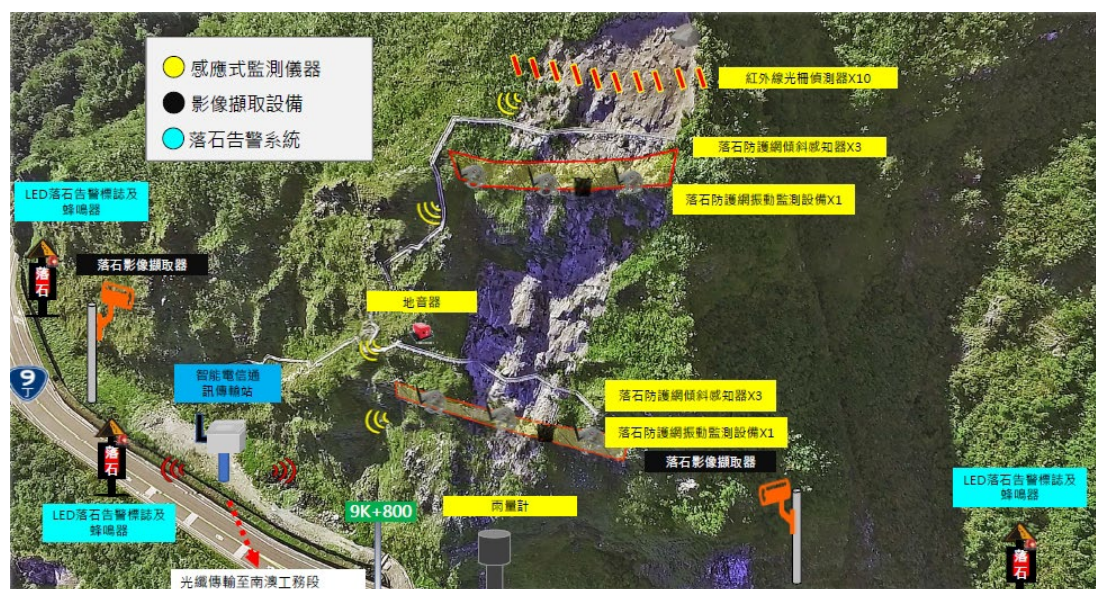
資料來源：無人機於防災之應用分享與 AI 應用之展望^[24]

3. InSAR

利用 2 個或多個合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)，在同個範圍和相似的制高點但不同的時間點進行拍攝，藉此蒐集資訊並生成地表變位或數值高程地圖，稱為干涉合成孔徑雷達(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)。InSAR 可獲得極高的空間解析度雷達影像，目前已廣泛做為邊坡災害或山崩復發之評估工具。

過往公路局於蘇花公路台 9 線 112k+400 及 145k 路段，以及台 20 線 105K~153K(梅山至向陽)路段等，皆運用 InSAR 於地表變形量評估分析工作。

除運用遙測技術監控高風險邊坡外，公路局為確保用路人車行的安全，針對落石來源無法確定或機械能量無法到達之落石型邊坡，發展「落石告警系統」，目的為攔截落石、消損能量、災害告警。其運用紅外線光柵偵測、落石防護網振動監測線纜、應變計、地音計等，結合通訊傳輸至路側 LED 告警牌面及蜂鳴器，第一時間告警駕駛注意前方路段落石風險，並回傳相關訊息至工務段，人員亦可透過架設之 CCTV 影像監控現場狀況(如圖 3.15)。



資料來源：智慧防災 4.0 公路防災四防線^[26]

圖 3.15 公路局佈設之落石告警系統(台 9 丁線 9K+800)

3.2.2 高速公路局

高速公路局負責我國國道養護工作，國道總里程長約為 1,061.8 公里，並負責路權內邊坡之維護管理，為確保國道邊坡的安全及避免用路人的生命財產損失，其編訂「高速公路養護手冊(最新修訂版本：112 年 9 月)」^[27]辦理國道邊坡全生命週期之維護管理工作。

依高速公路局官網說明國道邊坡全生命週期維護管理作業的導入主要分為兩進程。第一階段為自 99 年 4 月國道 3 號 3.1k 邊坡坍塌事件後，高速公路局為確實掌握及管理國道邊坡之安全狀況，因應國道邊坡全生命週期維護管理需求，進行「國道邊坡補強實施」計畫，主要包含國道邊坡總體檢與補強、養護手冊邊坡章節修訂及國道邊坡全生命週期維護管理系統建置。

第二階段自 103 年 1 月起，依據函頒養護手冊規定，國道邊坡全面進入全生命週期維護管理的實行與持續成效追蹤及精進，該階段的邊坡作業主要著重於邊坡巡查作業規定。高速公路局國道邊坡維護管理制度，除涵蓋邊坡維護相關作業規定外，亦包含邊坡資料保存及運用、人員訓練與邊坡維護作業成效管理等，並於此階段依據邊坡其需處理之程度，導入邊坡分級制度，分為 A、B、C、D 共 4 個等級(如表 3-19)。

邊坡養護依據邊坡分級不同有其相對應的頻率，並依據邊坡定期巡查作業、邊坡監測作業與地錨檢測作業之資料綜整，結合邊坡災害潛感因子與邊坡風險規模，回饋邊坡安全評估，適時調整邊坡分級，達到滾動式管理。其中邊坡巡查初步分級(A_i、B_i、C_i 及 D_i)可提供工務段維護工程優先順序之參考，邊坡分級(A、B、C、D)可做為邊坡維護管理作業分類參考。

高速公路局邊坡型式主要可分成路堤邊坡及路塹邊坡，路堤邊坡定義為因道路開闢而填方邊坡，路塹邊坡則為挖方邊坡，依照其官網統計至 114 年 3 月 31 日止，高速公路局轄下各分局管理之邊坡數量約有路堤邊坡 1,686 處，路塹邊坡 940 處，共計 2,626 處，各分局轄管路段並無 A、B 級邊坡(如表 3-20)。

表 3-19 高速公路局邊坡分級制度

邊坡分級	狀況說明
A	邊坡有明顯不穩定徵兆，需立即通知採取必要措施並配合密切巡查及監測
B	邊坡發現有些許疑似不穩定徵兆，需進行維護、補強與整治並加強巡查及監測
C	邊坡無明顯不穩定徵兆，仍需進行巡查或例行性維護，並視需要進行監測
D	邊坡處於穩定狀況，仍需進行巡查

資料來源：高速公路養護手冊(112年9月修訂版)^[27]

表 3-20 高速公路局邊坡各分級數量

邊坡分級 管理局處	A 級		B 級		C 級		D 級		合計(處)	
	路塹	路堤	路塹	路堤	路塹	路堤	路塹	路堤	路塹	路堤
北分局	0	0	0	0	375	51	152	286	527	337
中分局	0	0	0	0	83	92	135	594	218	686
南分局	0	0	0	0	81	46	114	617	195	663
小計	0	0	0	0	539	189	401	1497	940	1686
總計	0		0		728		1898		2626	

備註：邊坡數量統計至 114 年 3 月 31 日。

資料來源：<https://www.freeway.gov.tw/Publish.aspx?cnid=91>

高速公路局邊坡巡查係指就轄區內邊坡做巡視與檢查，巡查類別依巡查重點及頻率分為經常巡查、定期巡查及特別巡查，依照不同邊坡分類，訂立不同的巡查頻率(如表 3-21)。經常巡查重點在於對用路人是否造成影響，實施方法為以 2 人為 1 組乘坐汽車並於車上進行邊坡目視，若發現有可疑處應下車靠近檢查；定期巡查為定時對邊坡進行全面性且詳細的巡查，並記錄追蹤狀況，實施方法為利用徒步、攀登或特殊機械車輛儘可能靠近邊坡坡面、穩定設施及排水設施，以判定邊坡之安全情形；特別巡查係針對天然災害、事故或其他目的評估對邊坡的損害，以利適時進行維護、補強與整治。後續依巡查結果再重新評估邊坡分級是否合理，並進行相應之後續維護工作。

表 3-21 高速公路局巡查頻率規定

類別	經常巡查	定期巡查	特別巡查
頻率	路塹邊坡： 每天至少 1 次 路堤邊坡： 每月至少 1 次，以日間巡查為主	A 級： 每月 1 次 B 級： 每季 1 次 C 級： 每年 1 次 D 級： 每 3 年 1 次，可分年分段完成。C 級坡及 D 級坡之定期巡查作業應於當年度汛期前至少完成 1 次。	於颱風(7 級風暴半徑內之警戒範圍)、豪雨(24 小時累積雨量達 200 毫米以上或 3 小時累積雨量達 100 毫米以上)、地震(地區震度 4 級以上)或人為破壞因素(如火災或車輛撞損等)後，經啟動特別巡查後 3 個日曆天辦理完畢，若數量眾多可針對優先關注對象先行，其餘 C 級以上路塹邊坡則於優先關注對象完成後 14 日曆天內完成。
巡查重點	對用路人造成影響，需緊急維護之崩塌異狀或損壞	定期實施邊坡全面巡查，早期發現劣化狀況並評估安全	評估天災及事故後是否造成邊坡損害，以利適時進行維護、補強與整治

資料來源：高速公路養護手冊(112 年 9 月修訂版)^[27]

高速公路局邊坡巡查項目主要以坡面、穩定設施和排水設施為主，邊坡定期巡查項目則依路堤邊坡及路塹邊坡有所區分(如表 3-22、表 3-23)，該兩表中檢查項目有註記*字者，為後續邊坡初步分級參考項目。巡查作業完成後，依結果再配合「邊坡災害潛感因子評估參考表」(如表 3-24)，進行巡查初步分級(Ai、Bi、Ci 及 Di 級)(如表 3-25)。如巡查初步分級結果為 Ai 級時，須由專業廠商或工務段評估是否採取如緊急性處置及加強邊坡巡查、邊坡監測等必要措施，並於當季完成邊坡維護工作；巡查初步分級結果為 Bi 級時，工務段應於 1 年內完成邊坡維護工作。

表 3-22 高速公路局路塹邊坡檢查影響程度參考說明

項次		檢查項目	影響程度		
			低 (功能性仍良好， 不需採取維護作 業)	中 (不影響邊坡安 全，維護作業不具 急迫性)	高 (對邊坡安全性可 能影響，維修作業 具有急迫性)
坡 面	1*	邊坡坡頂裂縫 或陷落	無明顯異常裂縫	有差異沉陷產生	明顯裂縫或凹陷
	2*	路面龜裂或局 部陷落、隆起	路面無明顯異常 現象	路面張力裂縫不 大，無陷落	路面出現陷落或 隆起
	3*	坡面鼓出、滑 移、坍塌或崩落	無明顯異常裂縫 或坍塌	裂縫或僅有小坍 陷發生	明顯裂縫或有大 坍塌
	4*	坡面侵蝕、沖 刷、回填材料流 失	植被良好	坡面有裸露	有沖蝕、雨蝕溝之 現象
	5*	坡面異常滲水	無異常滲水	有異常滲水但影 響輕微	有異常滲水
	6*	落石	無落石發生徵兆	有潛在落石發生 徵兆，但不影響行 車安全	有潛在落石發生 徵兆或有落石，且 會影響行車安全
	7	超載堆積物(含 垃圾)	無堆積現象	僅少數堆積，且未 位於坡頂	堆積量大，且位於 坡頂
	8	樹木傾倒、植生 枯損、雜草異常 茂盛	無傾倒或目視不 明顯	現象輕微	多處有傾斜或明 顯異於周邊
	9	路權內耕作或 佔有	無耕作或佔有現 象	疑似有耕作或佔 有現象	確認有耕作或佔 有現象
	10	監測設施外觀 損傷	無損傷	損傷尚不影響監 測設備之運作	損傷已可能影響 監測設施之運作
	11*	路權外土地利 用改變或加載	無土地利用改變 或加載	疑似有土地利用 改變或加載	確認有土地利用 改變或加載
穩 定 設 施	1*	混凝土(噴凝土) 裂縫、龜裂	無明顯異常裂縫、 龜裂現象	有明顯裂縫或龜 裂	多處發生且位於 下部位置
	2*	擋土設施沉陷、 傾斜，移位或基 礎淘空	無明顯異常整體 沉陷移動	輕微整體沉陷移 動	明顯整體沉陷移 動
	3*	護坡設施變形、 鼓出或凹陷	無明顯龜裂變形 或僅表層龜裂	有明顯裂縫但無 傾斜外凸	明顯傾斜或外凸
	4*	設施接縫異樣、 開裂分離或劣 化	不明顯	有少數裂縫但無 傾斜或位移	多處發生，且有明 顯異於周邊之傾 倒或位移情形

	5*	箱籠、加勁擋土牆牆面破損、土石外露	無破損	牆面破損，土石外露但未流失	牆面破損且土石嚴重流失
	6*	混凝土材料劣化、剝落或其他異常	無或少數僅發生於上部位置	發生於中間位置	多處有損壞或發生於下部位置
	7*	鋼筋外露銹蝕	無或少數僅發生於上部位置	發生於中間位置	多處有損壞或發生於下部位置
	8*	框梁、格梁周圍沖刷及淘空	無明顯沖刷及淘空	輕微沖刷及淘空	明顯沖刷及淘空
	9*	設施表面異常滲水	無異常滲水	有異常滲水但影響輕微	有異常滲水
	10*	錨頭保護蓋破損、掉落、鋼腱外露或防銹脂外洩	無破損、掉落、鋼腱外露或防銹脂外洩	少數破損、掉落、鋼腱外露或防銹脂外洩	錨頭破損、掉落、鋼腱外露或防銹脂外洩情形普遍
	11*	地錨錨頭周圍沖蝕及淘空	無明顯沖刷及淘空	輕微沖刷及淘空	明顯沖刷及淘空
	12*	地錨承壓結構體破損掉落	無承壓結構體損壞現象	少數承壓結構體損壞現象	承壓結構體嚴重損壞
排水設施	1*	排水溝(井)銜接不良、中斷、斷裂、破損、變形	無異常	僅有少部分斷裂、破損，不影響排水功能	排水溝斷裂、破損、變形導致排水流失或水溢流至排水溝外
	2	排水溝(井)堵塞、淤積	僅局部淤積	排水不良且有積水現象	堵塞、淤積情形嚴重，導致水流溢流至排水溝外
	3*	水平排水管、洩水孔堵塞或細粒料流失	排水功能良好	細粒料伴隨排水流失	排水功能喪失，由坡面或其他設施表面滲水
	4*	排水溝(井)外側或底部沖刷、下陷	無明顯沖刷及下陷	輕微沖刷及下陷	明顯沖刷及下陷
	5*	排水溝(井)混凝土裂縫、剝落、鋼筋外露銹蝕	無異常裂縫、剝落	僅有少分裂縫，不影響排水功能	混凝土多處裂縫及剝落，造成鋼筋外露銹蝕

資料來源：高速公路養護手冊(112年9月修訂版)^[27]

表 3-23 高速公路局路堤邊坡檢查影響程度參考說明

項次	項目	影響程度			
		低 (功能性仍良好， 不需採取維護作 業)	中 (不影響邊坡安 全，維護作業不具 急迫性)	高 (對邊坡安全性可 能影響，維修作業 具有急迫性)	
坡面	1*	邊坡坡頂裂縫 或陷落	無明顯異常裂縫	有差異沉陷產生	明顯裂縫或凹陷
	2*	路堤坡趾路面 龜裂或局部陷 落、隆起	路面無明顯異常 現象	路面張力裂縫不 大，無陷落	路面出現陷落或 隆起
	3*	坡面鼓出、滑 移、坍塌或崩落	無明顯異常裂縫 或坍塌	裂縫或僅有小坍 陷發生	明顯裂縫或有大 坍塌
	4*	坡面侵蝕、沖 刷、回填材料流 失	植被良好	坡面有裸露	有沖蝕、雨蝕溝之 現象
	5*	坡面異常滲水	無異常滲水	有異常滲水但影 響輕微	有異常滲水
	7	超載堆積物(含 垃圾)	無堆積現象	僅少數堆積，且未 位於坡頂	堆積量大，且位於 坡頂
	8	樹木傾倒、植生 枯損、雜草異常 茂盛	無傾倒或目視不 明顯	現象輕微	多處有傾斜或明 顯異於周邊
	9	路權內耕作或 佔有	無耕作或佔有現 象	疑似有耕作或佔 有現象	確認有耕作或佔 有現象
	10	監測設施外觀 損傷	無損傷	損傷尚不影響監 測設備之運作	損傷已可能影響 監測設施之運作
	穩定 設施	1*	混凝土(噴凝土) 裂縫、龜裂	無明顯異常裂縫、 龜裂現象	有明顯裂縫或龜 裂
2*		擋土設施沉陷、 傾斜，移位或基 礎淘空	無明顯異常整體 沉陷移動	輕微整體沉陷移 動	明顯整體沉陷移 動
3*		護坡設施變形、 鼓出或凹陷	無明顯龜裂變形 或僅表層龜裂	有明顯裂縫但無 傾斜外凸	明顯傾斜或外凸
4*		設施接縫異樣、 開裂分離或劣 化	不明顯	有少數裂縫但無 傾斜或位移	多處發生，且有明 顯異於周邊之傾 倒或位移情形
5*		箱籠、加勁擋土 牆牆面破損、土 石外露	無破損	牆面破損，土石外 露但未流失	牆面破損且土石 嚴重流失
6*		混凝土材料劣 化、剝落或其他 異常	無或少數僅發生 於上部位置	發生於中間位置	多處有損壞或發 生於下部位置

	7*	鋼筋外露銹蝕	無或少數僅發生於上部位置	發生於中間位置	多處有損壞或發生於下部位置
	8*	框梁、格梁周圍沖刷及淘空	無明顯沖刷及淘空	輕微沖刷及淘空	明顯沖刷及淘空
	9*	設施表面異常滲水	無異常滲水	有異常滲水但影響輕微	有異常滲水
	10*	錨頭保護蓋破損、掉落、鋼腱外露或防銹脂外洩	無破損、掉落、鋼腱外露或防銹脂外洩	少數破損、掉落、鋼腱外露或防銹脂外洩	錨頭破損、掉落、鋼腱外露或防銹脂外洩情形普遍
	11*	翼牆裂縫、鼓出	翼牆無裂縫及鼓出	翼牆有少數裂縫但無鼓出	翼牆有明顯裂縫及鼓出
排水設施	1*	排水溝(井)銜接不良、中斷、斷裂、破損、變形	無異常	僅有少部分斷裂、破損,不影響排水功能	排水溝斷裂、破損、變形導致排水流失或水溢流至排水溝外
	2	排水溝(井)堵塞、淤積	僅局部淤積	排水不良且有積水現象	堵塞、淤積情形嚴重,導致水流溢流至排水溝外
	3*	水平排水管、洩水孔堵塞或細粒料流失	排水功能良好	細粒料伴隨排水流失	排水功能喪失,由坡面或其他設施表面滲水
	4*	排水溝(井)外側或底部沖刷、下陷	無明顯沖刷及下陷	輕微沖刷及下陷	明顯沖刷及下陷
	5*	排水溝(井)混凝土裂縫、剝落、鋼筋外露銹蝕	無異常裂縫、剝落	僅有少部分裂縫,不影響排水功能	混凝土多處裂縫及剝落,造成鋼筋外露銹蝕

資料來源：高速公路養護手冊(112年9月修訂版)^[27]

表 3-24 高速公路局邊坡災害潛感因子評估參考表

項次	評估項目	評估標準		
		低	中	高
邊坡災害潛感因子	1 邊坡地層位態	斜交、逆向坡,或順向坡但滑動面未出露	順向坡且滑動面出露,傾角小於 20 度	順向坡且滑動面出露,傾角大於 20 度
	2 災害歷史	無災害歷史或補強	曾有災害歷史並辦理補強工程,但已完工超過 5 年以上	曾有災害歷史並辦理補強工程,補強完工時間為近 5 年內
	3 活動斷層	無鄰近活動斷層	鄰近活動斷層 200 m 內	鄰近活動斷層 100 m 內

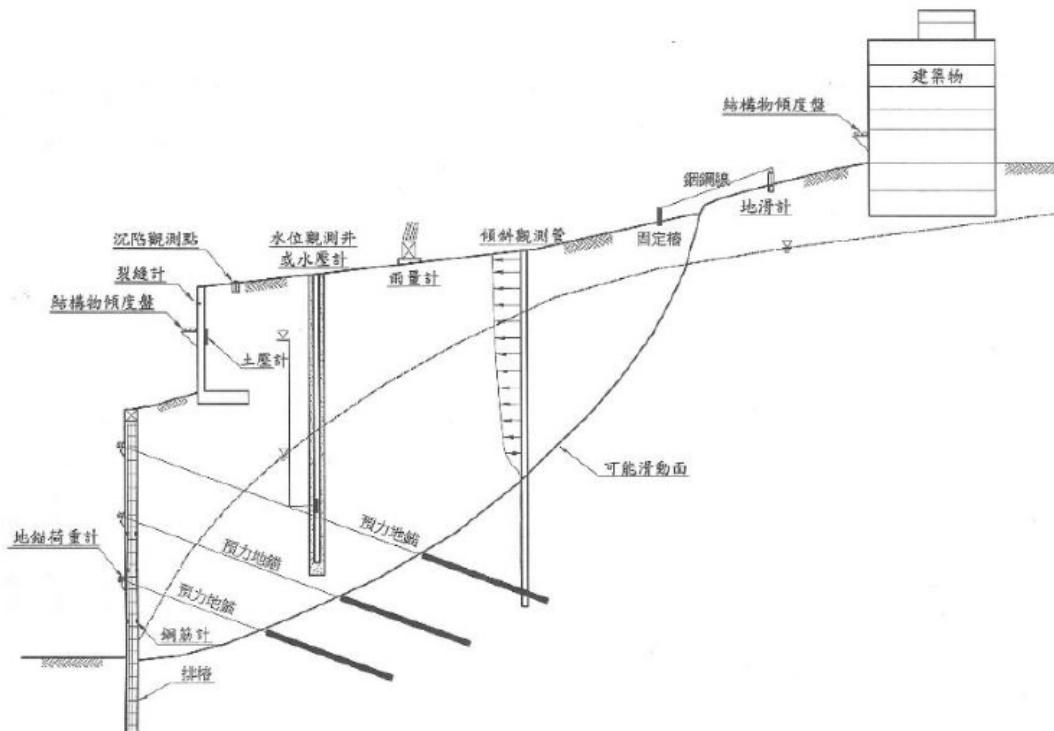
資料來源：高速公路養護手冊(112年9月修訂版)^[27]

表 3-25 高速公路局邊坡巡查結果初步分級

邊坡分級	狀況說明
Ai	邊坡巡查分級項目有 1 項以上為高，且邊坡災害潛感因子評估有 1 項為高
Bi	邊坡巡查分級項目有 2 項以上為中，且邊坡災害潛感因子評估有 1 項為中
Ci	排除 Ai、Bi、Ci 分級以外之狀況
Di	邊坡巡查分級項目均為低，且邊坡災害潛感因子皆為低

資料來源：高速公路養護手冊(112 年 9 月修訂版)^[27]

高速公路局針對國道邊坡監測作業部分則主要區分人工量測與自動量測兩大類，相關監測儀器包含水位觀測井、水壓計(豎管式或電子式)、傾度管(儀)、地錨荷重計、傾斜計、雨量計、裂縫計(機械式或電子式)等等，邊坡監測儀器其整體配置示意如圖 3.16。監測頻率則依照邊坡分級予以訂立(如表 3-26)。



資料來源：高速公路養護手冊(112 年 9 月修訂版)^[27]

圖 3.16 邊坡監測儀器配置示意圖

表 3-26 高速公路局監測頻率規定

邊坡分級	A	B	C	D
頻率	每週至少 1 次 持續至補強工程完成後，再視其邊坡分級進行調整	每月至少 1 次 持續至補強工程完成後，再視其邊坡分級進行調整	每季至少 1 次 若資料趨於穩定至少 3 年後，由專業廠商判讀與建議，經工務段審核完成後調整為每半年至每一年 1 次	原則上無須設置監測儀器，惟考量鄰近邊坡處有其他重要保全對象而設置時，其監測頻率依 C 及邊坡規定

資料來源：高速公路養護手冊(112 年 9 月修訂版)^[27]

檢測規定則以地錨檢測為主，包含錨頭保護蓋外觀、錨頭組件檢視及地錨揚起試驗等，並進行功能評分(如表 3-27)，依頻率不同區分為定期檢測和特別檢測，定期檢測執行方式為利用徒步、攀登方式或特殊檢測儀器靠近地錨設施予以實施檢查，頻率亦依邊坡分級有所差異(如表 3-28)，並可分年分段完成，而特別檢測則係於邊坡巡查、監測後評估地錨設施功能降低或喪失，導致邊坡穩定性降低時為之。

表 3-27 高速公路局地錨功能評分表

項次	項目	功能影響配分	檢視內容	權重
1	錨頭保護蓋外觀檢視	15	錨頭保護蓋掉落	0
			<ul style="list-style-type: none"> ✓ 錨頭保護蓋與受壓版分離大於 2mm ✓ 保護蓋嚴重破損銹蝕 ✓ 水質為強烈腐蝕 	0.25
			<ul style="list-style-type: none"> ✓ 錨頭保護蓋與受壓版分離且小於 2mm ✓ 受壓版開裂或下方表土掏空 ✓ 保護蓋凹陷或螺絲鬆脫 ✓ 水質為顯著腐蝕 	0.5
			<ul style="list-style-type: none"> ✓ 錨頭保護蓋週邊滲水、白華或錨座外觀輕微破損銹蝕 ✓ 水質為中等腐蝕 ✓ 防銹脂有洩漏情形 	0.75
			<ul style="list-style-type: none"> ✓ 無異狀 ✓ 水質正常 	1.0

2	錨頭組件檢視	20	組件脫落(夾片脫落，鋼腱內縮或斷裂)	0
			鋼腱或錨頭表面可見局部鐵銹碎片和裂縫分佈表面積大於50%以上，鋼腱橫切面已因銹蝕而變形(深層銹蝕)	0.25
			鋼腱或錨頭表面可見局部鐵銹碎片和裂縫但分佈表面積小於50%(嚴重銹蝕)	0.50
			✓ 輕微銹蝕或滲水。錨頭有銹蝕現象，銹蝕深度淺薄，無法量測或小於0.1mm ✓ 防銹脂有劣化情形	0.75
			無銹蝕且無滲水	0
3	既存荷重	65	拉脫、鋼腱斷裂或 $Tr(\text{施拉預力})=0$	0
			$Tr > 1.2Tw$ (設計荷重)	0.33
			$Tr \leq 0.2Tw$	
			$0.2Tw < Tr \leq 0.5Tw$	0.66
			$0.5Tw < Tr \leq 0.8Tw$	0.77
			$0.8Tw < Tr \leq 1.2Tw$	1.0
總分(單一地錨功能評分 β)				

備註 1：錨頭周圍若有滲水現象，且可取得足夠進行試驗之水量時，經專業廠商評估後，依其建議之時間及地點進行水質取樣及檢驗，並依檢驗結果判斷水質對混凝土及鋼筋之腐蝕性。

備註 2：保護蓋掉落者經專業廠商初步評判其地錨仍保有效能者，則由專業廠商判斷是否辦理後續組件檢視及揚起試驗。

備註 3：1、2、3 項次之檢視內容中，任一項評分出現權重為 0 時，則視為該地錨功能喪失，該地錨之總分亦歸為 0。

資料來源：高速公路養護手冊(112 年 9 月修訂版)^[27]

表 3-28 高速公路局地錨檢測頻率規定

邊坡分級	A	B	C	D
頻率	每半年至少 1 次	每 2 年至少 1 次	每 4 年至少 1 次	

資料來源：高速公路養護手冊(112 年 9 月修訂版)^[27]

國道邊坡經由內部因子(巡查、監測及地錨檢測及安全評估等資料審視)後，併同外部因子(集水區劃設與水系分析、集水區內裸露地判釋)，輔以邊坡穩定分析及現地檢視結果，高速公路局將依據相關資料，每 4~5 年委由專業廠商協助進行邊坡總體檢成果分級，共分為 A、B1、B2、C+、C、D 共六個等級(如表 3-29)。

表 3-29 高速公路局邊坡總體檢成果分級

邊坡分級	狀況說明
A	邊坡有明顯不穩定徵兆，需立即通知採取必要措施並配合密切巡查及監測。
B1	經總體檢後，邊坡因外部因子影響發現有些許疑似不穩定徵兆，需進行維護、補強與整治並加強巡查及監測。
B2	經總體檢後，邊坡因內部因子影響發現有些許疑似不穩定徵兆，需進行維護、補強與整治並加強巡查及監測。
C+	邊坡無明顯不穩定徵兆，惟經總體檢後，需調整巡查、監測、檢測等養護作為。
C	邊坡無明顯不穩定徵兆，仍需進行巡查或例行性維護，並視需要進行監測。
D	邊坡處於穩定狀況，仍需進行巡查。

資料來源：高速公路養護手冊(112 年 9 月修訂版)^[27]

3.3 小結

綜上，本計畫整理鐵路(臺鐵公司、高鐵公司、阿里山林鐵)及公路(公路局、高速公路局)邊坡養護單位之分級制度，如表 3-30 所示。

表 3-30 鐵公路邊坡養護單位之邊坡分級制度整理

邊坡	單位	分級制度
鐵路 邊坡	臺鐵公司	A ●邊坡有明顯不穩定徵兆，且可能影響列車通行 ●需採取必要之維護、補強、整治或列車通行管理等緊急處理措施，並配合密切巡查及監測
		B ●邊坡有疑似不穩定徵兆，且可能影響列車通行 ●需採取必要之維護、補強或整治措施，並加強巡查及監測
		C ●邊坡無明顯不穩定徵兆 ●仍需進行巡查或例行性維護，並視需要進行監測

邊坡	單位	分級制度								
		<p>D</p> <ul style="list-style-type: none"> ●邊坡處於穩定狀況 ●仍需進行巡查 ●或可解除列管，回歸各路線保養作業 								
	高鐵公司	<p>A</p> <p>邊坡狀況：輕微不穩定 營運安全：有影響 應對行動：進行整治</p> <p>B</p> <p>邊坡狀況：疑似不穩定 營運安全：可能有影響 應對行動：加強監測，必要時整治</p> <p>C</p> <p>邊坡狀況：疑似不穩定 營運安全：不造成影響 應對行動：定期監測</p> <p>D</p> <p>邊坡狀況：穩定 營運安全：不造成影響 應對行動：例行維護</p>								
	阿里山林鐵	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td data-bbox="475 1180 657 1742" style="width: 30%; vertical-align: top;"> <p>A</p> <p>有明顯不穩定或劣化情形且有影響行車之疑慮</p> </td> <td data-bbox="657 1180 1425 1742" style="width: 70%; vertical-align: top;"> <p>A-1</p> <ul style="list-style-type: none"> ●監測結果顯示滑動位置、趨勢明確者 ●有大規模、中小型崩塌潛勢且巡檢發現土砂災害徵兆明顯 ●每日車次頻率高，列為優先修繕路段 ●車廂翻落風險高之路段 <p>A-2</p> <ul style="list-style-type: none"> ●位在彎道或隧道口附近，火車行駛時視線不良者 ●有二次災害或邊坡土砂災害範圍擴大可能者 <p>A-3</p> <ul style="list-style-type: none"> ●既有擋土牆裂縫發展性待確認者 ●坡長較短、土砂災害影響範圍較小者 </td> </tr> <tr> <td data-bbox="475 1742 657 1834" style="vertical-align: top;"> <p>B</p> <p>疑似不穩定但並無立即影響行車安全之疑慮或無開放通車者</p> </td> <td data-bbox="657 1742 1425 1834"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="475 1834 657 1924" style="vertical-align: top;"> <p>C</p> <p>未明顯不穩定且無立即影響行車安全之疑慮</p> </td> <td data-bbox="657 1834 1425 1924"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="475 1924 657 2013" style="vertical-align: top;"> <p>D</p> <p>穩定狀況</p> </td> <td data-bbox="657 1924 1425 2013"></td> </tr> </table>	<p>A</p> <p>有明顯不穩定或劣化情形且有影響行車之疑慮</p>	<p>A-1</p> <ul style="list-style-type: none"> ●監測結果顯示滑動位置、趨勢明確者 ●有大規模、中小型崩塌潛勢且巡檢發現土砂災害徵兆明顯 ●每日車次頻率高，列為優先修繕路段 ●車廂翻落風險高之路段 <p>A-2</p> <ul style="list-style-type: none"> ●位在彎道或隧道口附近，火車行駛時視線不良者 ●有二次災害或邊坡土砂災害範圍擴大可能者 <p>A-3</p> <ul style="list-style-type: none"> ●既有擋土牆裂縫發展性待確認者 ●坡長較短、土砂災害影響範圍較小者 	<p>B</p> <p>疑似不穩定但並無立即影響行車安全之疑慮或無開放通車者</p>		<p>C</p> <p>未明顯不穩定且無立即影響行車安全之疑慮</p>		<p>D</p> <p>穩定狀況</p>	
<p>A</p> <p>有明顯不穩定或劣化情形且有影響行車之疑慮</p>	<p>A-1</p> <ul style="list-style-type: none"> ●監測結果顯示滑動位置、趨勢明確者 ●有大規模、中小型崩塌潛勢且巡檢發現土砂災害徵兆明顯 ●每日車次頻率高，列為優先修繕路段 ●車廂翻落風險高之路段 <p>A-2</p> <ul style="list-style-type: none"> ●位在彎道或隧道口附近，火車行駛時視線不良者 ●有二次災害或邊坡土砂災害範圍擴大可能者 <p>A-3</p> <ul style="list-style-type: none"> ●既有擋土牆裂縫發展性待確認者 ●坡長較短、土砂災害影響範圍較小者 									
<p>B</p> <p>疑似不穩定但並無立即影響行車安全之疑慮或無開放通車者</p>										
<p>C</p> <p>未明顯不穩定且無立即影響行車安全之疑慮</p>										
<p>D</p> <p>穩定狀況</p>										

邊坡	單位	分級制度	
公路 邊坡	公路局	定性	定量
		A 災害紀錄：2年內 護坡設施：復(興)建中 不穩定徵兆：明顯	落石災害評分系統(RHRS) ● 落石危害觸動條件因子 1. 地形、 2. 地質、 3. 植被及水流狀況 4. 氣候 ● 行車安全風險因子 5. 落石坍方歷史 6. 規模尺寸 7. 行車曝露度 8. 緩衝腹地 9. 聯外替代道路有無 ● 殘餘風險因子 10. 設置防護設施完成時間及 驗證成效
		B 災害紀錄：2年內 護坡設施：無法設置 不穩定徵兆：疑似	
		C+ 經工程手段復(興)建完成，惟仍具 備以下遠端致災因素導致不穩定 跡象： ● 需持續關注之上/下邊坡 ● 曲流/浪襲攻擊面邊坡 ● 坡頂人為開發 ● 明隧道上方邊坡	-
		C 災害紀錄：5年內 不穩定徵兆：無	-
		D 災害紀錄：無 不穩定徵兆：無	-
	高速公路局	A 邊坡有明顯不穩定徵兆，需立即通知採取必要措施並配合密切巡查 及監測	
		B 邊坡發現有些許疑似不穩定徵兆，需進行維護、補強與整治並加強 巡查及監測	
		C 邊坡無明顯不穩定徵兆，仍需進行巡查或例行性維護，並視需要進 行監測	
		D 邊坡處於穩定狀況，仍需進行巡查	

第四章 鐵公路邊坡維護管理結合 AI 應用說明

經前章整理之鐵公路邊坡轄管單位之維護管理機制，其皆定期辦理邊坡外觀巡查作業，並依路線與邊坡特性、潛在災損規模及安全性要求等，設置各式地表及地下監測儀器進行監控，而部分設置地錨之場址，則進行地錨檢測相關工作，並依各項作業成果，進行穩定性和安全性評估以及風險分級。以下針對各邊坡管理手段，結合 AI 輔助應用之應用場景進行說明，並整理相關應用實例提供參採。

4.1 邊坡巡查

邊坡巡查之目的是確保邊坡穩定性並提高行車安全性，養護單位依手冊、規範等規定確實執行巡查工作，以初步瞭解邊坡狀況，並及早發現異常現象。目前邊坡巡查已高度制度化，巡查項目主要涵蓋邊坡本體、穩定設施與集水區內邊坡排水或坡面逕流水，其可能造成路基流失災害之影響範圍，主要針對以下項目：

1. 邊坡本體

浮石、坍塌、裂縫、鼓起、沖刷、滲水，以及樹木有無傾倒等情形。

2. 排水設施

排水溝(井)之斷裂、變形、破損、堵塞、淤積、外側或底部沖刷及淘空，以及外觀混凝土有無剝落、鋼筋裸露鏽蝕等情形。

3. 坡體(面)保護設施

外觀位移、變形、龜裂、突出和凹陷、破損外露，以及有無材料劣化、淘空和異常滲水等情形。

4. 其他

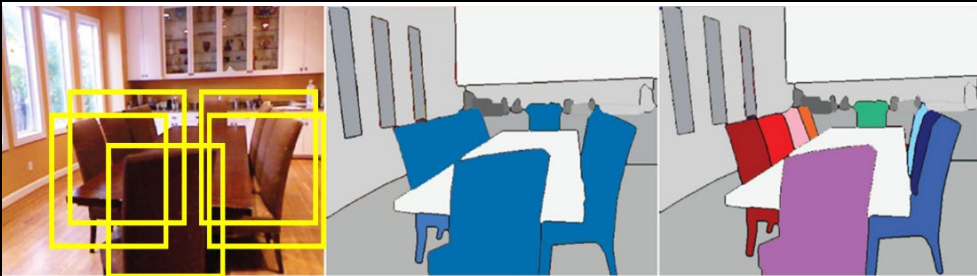
監測設備外觀損傷、非法耕作和佔用及有無廢棄物堆積等情形。

前揭巡查項目依嚴重性和影響程度低至高做定性之分類，並以人為直接目視或利用 UAV 等航遙測儀器間接蒐集影像方式辦理。目前

養護單位完成之巡查工作紀錄、各項表單及蒐集大量災害及損傷影像，目前皆保存於其建置邊坡全生命週期管理系統或資料庫，皆係可提供 AI 電腦視覺影像辨識技術學習之素材，應用場景如：項目判別及分類、異狀判識及分類、劣化標記及範圍量化和嚴重程度輔助分級。

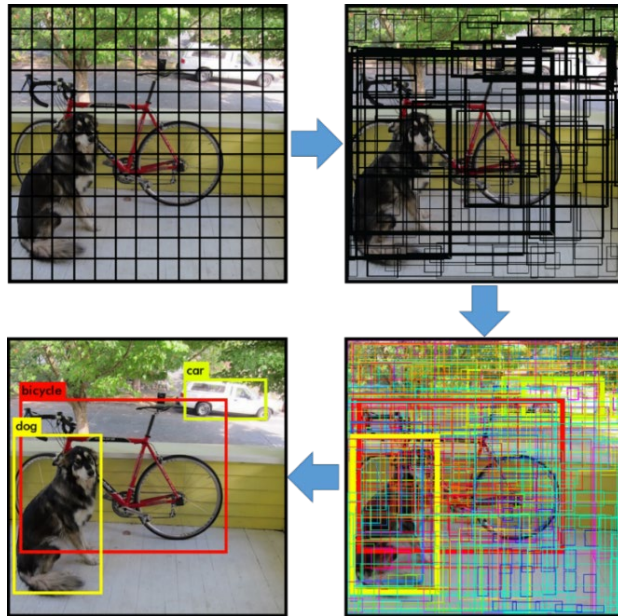
巡查人員攜帶手機、平板等電子設備，至現場進行執行巡查工作時，可結合電腦視覺深度學習模型，例如：Faster R-CNN、Mask R-CNN 或 YOLO 模型進行圖像分類與物件偵測。前揭模型以卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)架構為基礎進行變體，如 Mask R-CNN 可定位影像中該物件之精確像素所在，從原本語意分割(Semantic Segmentation)進一步至實例分割(Instance Segmentation)(如表 4-1)。

表 4-1 物件偵測、語意分割和實例分割

	物件偵測	語意分割	實例分割
說明	將影像中經過模型學習過的所有物件類別加以偵測。	可偵測影像中的每個像素其所屬的類別屬性。	融合物件偵測及語意分割，可針對影像中同一種類但不同實例再予區別。
舉例			

資料來源：<https://blog.roboflow.com/difference-semantic-segmentation-instance-segmentation/>

YOLO 為 You Only Look Once 的縮寫，其與 R-CNN 一樣皆是常見用於物件偵測之深度學習神經網路模型(如圖 4.1)，然而它擁有整體模型架構輕巧、計算速度快之優勢，較適合開發於便攜式裝置或微型電腦上，此外，YOLO 開放之程式碼使產學業界等社群間都能依照任務目的來調整、改善並提出精進後版本。



資料來源：You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection.^[28]

圖 4.1 YOLO 物件偵測流程

例如高速公路局邊坡巡查檢查項目之一：錨頭保護蓋外觀，已提供出各嚴重度分級示意圖(如圖 4.2)，若相關資料集交付 AI 學習和訓練，可協助人員進行劣化程度判識，或利用生成式 AI，例如：生成對抗網絡(GANs)、GPT 等，以一問一答方式提供影像分析，提升人員判別劣化一致性，亦可應用於資料增強(Data Augmentation)，生成以假亂真之影像，拓展資料集並提升訓練樣本，或彌補劣化影像不足問題。

				
X. 功能喪失-錨頭保護蓋遺失或掉落	A. 極差-錨頭保護蓋與受壓板分離大於 2mm	B. 不佳-錨頭保護蓋與受壓板分離，且小於 2mm 或受壓板開裂或下表面上掏空	C. 尚可-錨頭保護蓋周邊滲水、白華或矛頭外觀輕微破損	D. 正常-無異常

資料來源：高速公路養護手冊^[27]

圖 4.2 高速公路局錨頭保護蓋嚴重度分級示意圖

此外，公路局之 RHRS 定量評估因子，多具有公式化輸入和明確之評分標準，使得部分評分工作適合透過 AI 進行輔助或取代(想法整理如表 4-2)，優勢在於提升評分之客觀性與一致性，並提升數據整合效率，大幅減少人工查找、彙整和統計時間。

表 4-2 RHRS 評估因子結合 AI 輔助分析

RHRS 評估因子		AI 輔助評估說明	AI 輔助或取代潛力
A1 地形特徵	坡高	建議利用 UAV 近景攝影測量技術或光達(LiDAR)點雲數據，自動計算邊坡幾何尺寸和坡度，無需使用 AI 即可達成	無
	坡度		
A2 地質狀況	岩性	利用 AI 電腦視覺與多模態影像分析，可區分不同岩石面之紋理、顏色特徵和剝落模式，例如：泥岩石和頁岩通常有更明顯層理剝落和較深之風化顏色等，然而除非為全裸露岩坡，否則尚須考量植生濾除等課題，純憑影像進行 AI 判識為一大挑戰	低
A3 邊坡植被及水流狀況	植被面積	評估邊坡表面植被覆蓋面積百分比，可利用 AI 深度學習實例分割模型，藉由取得邊坡多光譜或高解析度影像，即可估算非植被區域與總面積之比例	高
	排水設施	利用 AI 電腦視覺及異狀偵測模型，可自動識別排水設施是否完整無損、存在淤積或清疏未達標等狀況	中
B1 氣象加權 C1 近 3 年平均落石坍方歷史 C3 交通流量狀況		有關氣象資料、災害歷史、交通流量等，皆可利用 API 串接中央氣象署資料開放平台、外部或內部資料庫等，從中獲取所需數據，並利用 AI 自然語言處理(Natural Language Processing, NLP)模型，協助提供人員相關資訊，並自動匹配評分級距	高

鑑於現今運用新科技、技術和設備於邊坡巡查工作已是常態，除原始影像外，可利用地面光達或空載遙測技術，取得更大範圍之邊坡正射影像、點雲模型及 DEM 等邊坡加值資料，以進行前後期變異判識、穩定性分析、災害範圍量測及量體估計以及輔助邊坡分級等應用。

公路局相較其他邊坡養護單位，其轄管範圍具有許多高聳及坡度超過 45 度之陡峭岩坡，致使人車不易抵達且目視效果有限，故在邊坡維護管理及防災需求上，僅能應用 UAV 來取得邊坡多時期影像，並進行多時期套疊及變異分析(如圖 4.3)，或災害範圍量測及量體估計等作業。

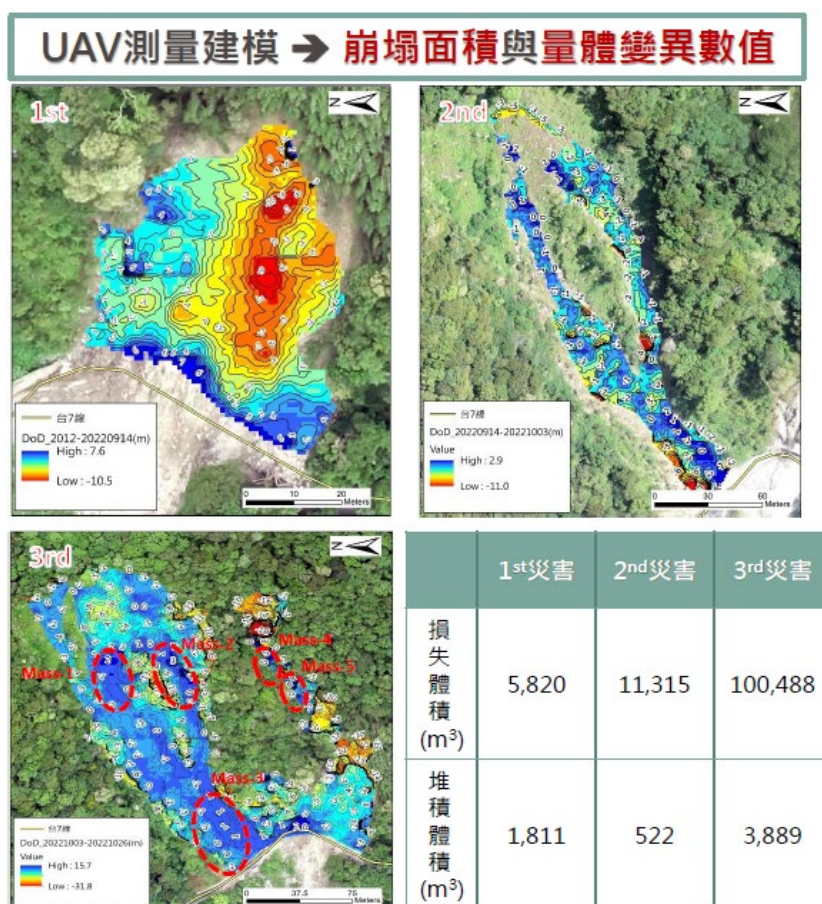


資料來源：埔里工務段、信義工務段優先關注邊坡光達應用暨進階檢測圖資建置計畫(第五期)^[29]

圖 4.3 公路局應用多時期空拍影像判識邊坡災害特徵

邊坡相關災害特徵可由專業人員以單一或多期影像，或利用前後期 3D 點雲模型、DSM 等進行判識並圈繪，故由人員先針對欲分析之災害特徵進行標註，並運用 AI 深度學習之語意分割或實例分割模型(如 Mask R-CNN)予以訓練，實現高解析度影像中災害類型之自動檢測，例如：識別張力裂縫大小、位置和方向；分析樹冠孔隙變異；影像自動分類為植被覆蓋區、裸露區或侵蝕區，並藉由多時序影像來預測其各區域發展趨勢等。

目前公路局運用 UAV 於邊坡應用場景，亦常見以邊坡正射影像進行崩塌範圍圈繪，應用點雲模型和 DSM 進行災害範圍量測及量體估計(如圖 4.4)，主要係以高程差分計算來進行變異值估算。未來可考慮切入 AI 應用部分：判別受災和未受災區域，使後續災損量體估計更加精確，以便預測清運量、研擬改善或加固方案(如表 4-3)。此外，生成式 AI 模型則可用於模擬不同災害條件下的影響範圍，幫助維管單位分析邊坡可能之演變過程和次生災害，以供預想在不同災害情境下之影響，俾決策者快速理解。



資料來源：三維數值模型在邊坡管理與科技防災之應用^[30]

圖 4.4 公路局應用 DSM 判識邊坡崩塌面積與量體變異

表 4-3 UAV 影像及加值產品結合 AI 應用邊坡場景之整理

UAV 產品	原始影像	正射影像	點雲模型	DSM
AI 應用場景	<ul style="list-style-type: none"> ● 劣化判識 ● 後續各式加值應用產製基礎 	<ul style="list-style-type: none"> ● 多時期套疊及變異分析 ● 受災區域發展預測 ● 災害範圍量測及量體估計 ● 輔助邊坡分級 		

4.2 邊坡地錨檢測

邊坡地錨檢測係就轄區內邊坡之地錨設施進行之檢查與量測，目的為及早發現異狀和劣化並改善之，主要內容包含：錨頭保護蓋外觀檢視、錨頭組件檢視、地錨揚起試驗。

錨頭保護蓋外觀檢視內容之錨頭保護蓋掉落、外觀凹陷、白華、銹蝕、防銹脂洩漏等目視可判斷之情形，已於前巡查一節提到可嘗試以 AI 深度學習電腦視覺判識進行異常分類、劣化標記等。

水質腐蝕性標準(如 pH 值、氯鹽量等)，係委由專業廠商進行取樣並檢驗，AI 可透過整合歷次檢測累積之水質數據，結合其他地錨指標，分析水質參數變化趨勢，協助預測地錨腐蝕風險以及評估殘餘壽命，俾利管理者制定更精確之維護和修復計畫。

4.3 邊坡監測

邊坡監測之目的是藉由安裝各式人工或自動量測儀器(例如：水位觀測井、雨量計、傾度管等)，並透過紀錄資料發現邊坡是否存有潛在異常和不穩定徵兆，俾使人員能採取有效之防護或應變措施。

無論人工或自動量測，若需應用監測數據進行分析使用，尚需進行補遺、除錯等數據清洗(Data Cleaning)工作。AI 可協處研判單一來源數據之穩定性、相關性、突變性及正確性，識別並標記異常或不合理之單點數據，確保後續使用之數據品質。另雖然目前部分自動化量測儀器已將數據回傳至管理系統，惟後續之研判與分析仍需交付專業人員執行，而 AI 模型即可協助進行災害之預測，根據過去一段時間之監測數據，結合 AI 掌握監測場域未來某時刻之變化以及趨勢(例如：位移、傾斜角、孔隙水壓或應變量等)，可以做為初步確認邊坡安全性、後續預警及應變處置和支援決策之參考。

此外，安裝來監測邊坡之多種不同類型儀器，相關量測紀錄可同時輸入 AI 模型，據以找出多個監測數據之間是否存在時間上、空間上或因果上之相互關係，實現跨儀器與多變數關聯分析。例如：運用雨量計和水位觀測井紀錄資料，建立 AI 降雨—地下水位時間序列迴

歸分析(Time Series Regression)模型，例如：深度學習之遞迴神經網路(Recurrent Neural Network, RNN)或長短期記憶網路(Long Short-Term Memory, LSTM)，並分析短長時降雨量、強度與地下水位上升幅度及滯後時間的相關性。若無降雨或鮮少降雨，卻發現水位仍持續上升，則可能有監測儀器失靈或其他入滲源等原因，AI 模型能協助偵測異常並藉以交互驗證；傾度管位移與地錨荷重計之交互影響，若位移與荷重同步增加，代表地錨正在發揮功能，反之，則需釐清異常原因，據以確認地錨有效性。

RNN 和 LSTM 為設計專門處理和時間有相關性之任務(即是現在的結果可能受過去因素所影響)之 AI 深度學習模型，例如：自然語言處理(NLP)、價格和數據預測等。RNN 的特色在於隱藏層間的權重會傳遞，使未來的輸入可以共享該權重後預測輸出，以達到特徵記憶之功效(如圖 4.5)，然而 RNN 缺點就是隨著時序資料越來越多，較早出現的資訊對後續影響甚微，進而無法很好的進行通盤考量。LSTM 為改善 RNN 缺點而生，其設有隱藏態(Hidden State)以及單元態(Cell State)(如圖 4.6)，目的為儲存當前資料特徵，使未來的輸入可以共享該特徵後預測輸出，隱藏態主要負責儲存短期的記憶，單元態則主要負責長期的記憶。

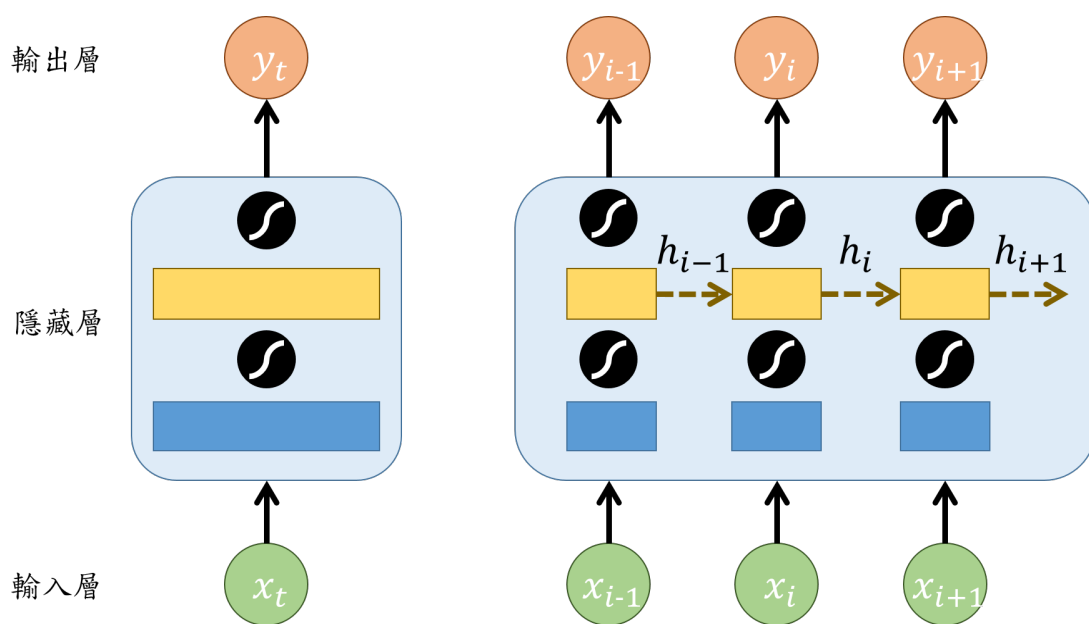
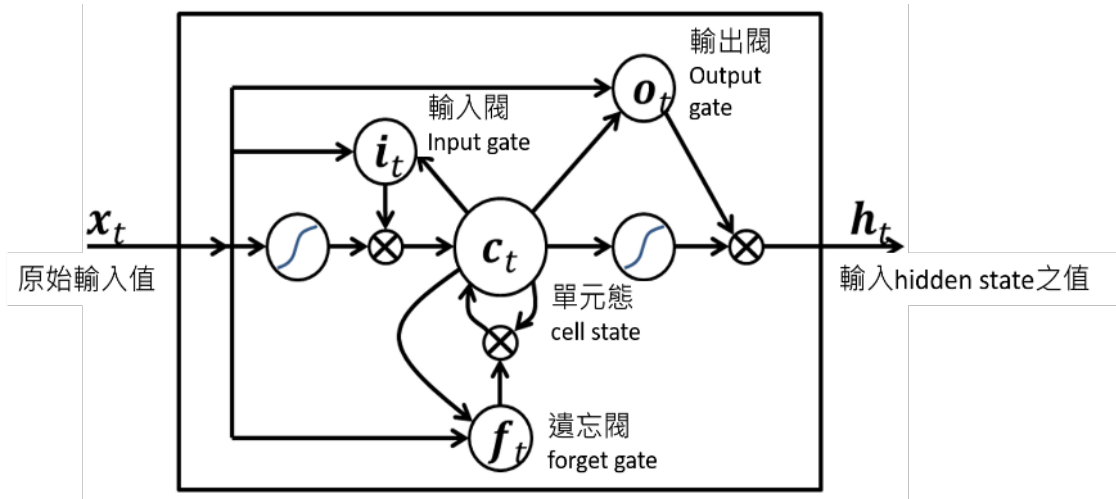


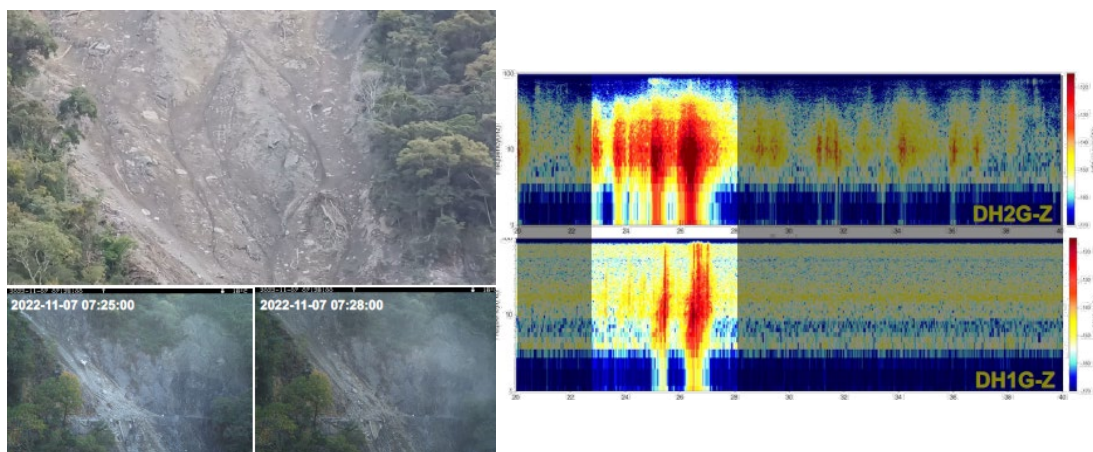
圖 4.5 一般深度神經網路(左)和 RNN(右)之結構比較



資料來源：<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=43992484>

圖 4.6 LSTM 運作原理示意圖

公路局與國立陽明交通大學合作研發落石微地動監測儀器與 CCTV 結合 AI 於邊坡之防災應用，於台 7 線 49.7K 大曼高風險路段進行實域驗證。其原理係利用建置於上下邊坡不同高程之微地動測站記錄振動訊號，再將訊號經傅立葉轉換得到時頻譜圖，並經人員由現場 CCTV 確認後標記落石出現之時頻態樣(如圖 4.7)，經訊號處理及分類後由 AI 進行判識，並結合道路告示牌和預警燈號，將落石資訊迅速傳遞利害關係人。



資料來源：微地動偵測邊坡滾落石事件：告警與預警之研究發展、實際應用及面臨的挑戰^[32]

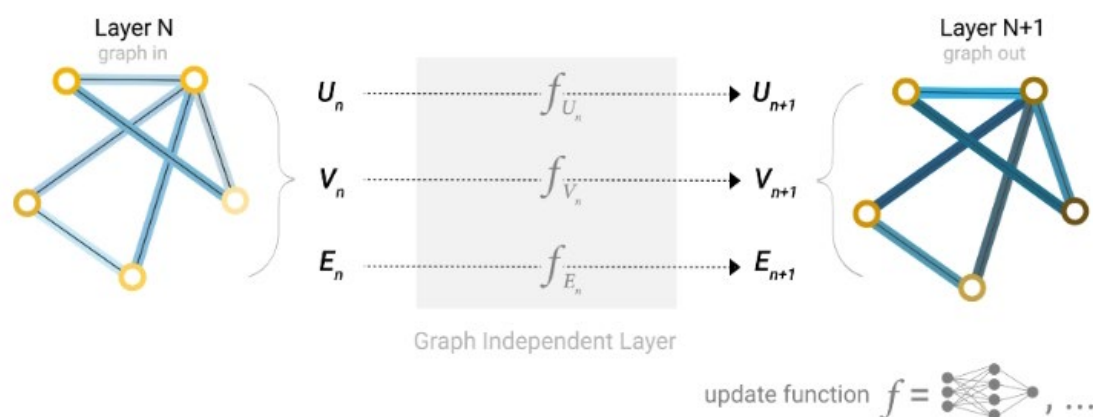
圖 4.7 公路局落石微地動監測儀器結合 AI 之應用

4.4 邊坡穩定分析及安全評估

邊坡穩定性受多重因子影響，AI 可結合邊坡歷史災害資料、實時監測數據與氣象預報，透過各項資料整合和監測數據的相關性，反推或驗證邊坡潛在之破壞模式，或針對管理值做探討精進。某一監測儀器之初始值與任一後續量測值之差值，達某一規定之限度值時，稱此監測值為「管理值」，鐵公路邊坡災防實務上可分為「警戒值」和「行動值」，如前章提到高鐵公司利用邊坡自動化監測系統，即針對平均降雨量和短時降雨量做警戒值和行動值之指標。

此外，不同於傳統使用邏輯迴歸(Logistic Regression)探討變數之間的關係，AI 深度學習模型之優勢在於可藉由輸入多變數進行時序預測，並待其同步達到異常閾值時(例如：高降雨量、高地下水位、快速位移同時發生)，才發出警報，輔助提升管理值之可靠度，並降低誤報率，以提供更全面之災防應變決策參考。邊坡監測儀器間常具有空間和時間關聯性，亦可考量應用圖像神經網路(Graphic Neural Network, GNN)模型捕捉彼此間之交互效應。

不同於 CNN 多用於影像分析，RNN 用於有規則之時間序列，GNN 係一類專門設計用來處理「圖結構資料(Graph-structured data)」之深度學習模型。圖結構資料指的並非圖片，而是由「節點」與「邊」構成之結構(如圖 4.8)，如於邊坡監測上，節點為感測器或測站及其蒐集之數據資料、邊為相鄰測站之間地理或物理耦合，可依照不同情況和目標進行設定。



資料來源：<https://distill.pub/2021/gnn-intro/>

圖 4.8 GNN 簡要結構示意

GNN 之每個節點都會根據鄰近節點資訊來更新狀態，核心步驟通常是兩個：(1)訊息傳遞、(2)聚合(Aggregation)(接收鄰近資訊並更新自我狀態)。節點間之幾何距離、上下游關係、特徵等，亦可透過權重調整來予以表示，故 GNN 優點在於能很好捕捉節點間之關聯性及相互影響，並可透過變體，例如 GNN 結合 CNN 結構的 Graph Convolutional Network(GCN);GNN 結合時間序列相關模型(如 LSTM、Transformer)的 Spatial-Temporal GNN(ST-GNN)等。來結合時序和空間資訊，融合多來源數據資料，具廣泛應用性，惟計算成本較高。

目前邊坡養護單位皆會針對具不穩定徵兆或有災害歷史之邊坡列出高風險路段，強化巡查工作並裝設 CCTV 進行異物入侵等即時偵測，並已利用 CCTV 結合 AI 影像辨識模型進行預警及告警作業。

林鐵及文資處於阿里山林鐵#29 隧道西洞口至#30 隧道東洞口間，設置 CCTV 並應用 AI 影像辨識技術，進行即時偵測邊坡落石與異物入侵軌道情形，若發現異樣將觸發告警系統，透過無線傳輸至現場告警牌面與手機通訊軟體，以通報列車司機及相關人員，使其能即時掌握軌道狀況，提升行車安全(如圖 4.9)。



資料來源：阿里山林業鐵路極端氣候下天然災變鐵道預警機制^[31]

圖 4.9 阿里山林鐵 AI 影像辨識機制

臺鐵公司利用 AI 影像辨識(主動偵測)與實體阻隔告警(被動防護)之複式聯防架構，建立邊坡外物入侵告警系統(如圖 4.10)，針對該轄管軌道淨空範圍進行全天候監控，用於廣域且具視覺辨識需求之高風險邊坡(目前計有 26 處)。AI 影像辨識方面採用智慧影像分析(Intelligent Video Analytics, IVA)技術，結合 AI 深度學習演算法，並運用現地槍型攝影機負責防護路段之定點監看，影像訊號直接後送至主機進行即時運算與 AI 影像辨識，鎖定軌道界限外 1.9 公尺範圍內之區域，當畫面中出現寬和高達 25 公分以上，並持續停留達設定時間之異物(如落石、倒木、闖入車輛)，系統即判定為異常並自動發送告警訊號。而現場亦架設一般監視攝影機和球型攝影機，提供確認現場 S 型告警燈等設備之運作狀態等即時影像畫面，供行控中心或工務段人員進行遠端二次確認，以避免誤判。



圖 4.10 臺鐵公司 AI 影像辨識現地照片

而針對視距不佳、落石可能直接衝擊軌道或車輛入侵風險較高之路段，採實體設施直接攔截並觸發告警，其以鋼纜、拉線或防護網構成實體偵測迴路，當落石崩落或外物撞擊導致鋼纜斷裂、拉扯或位移時，感測器即時偵測迴路異常，直接觸發告警，並與 AI 影像辨識形成互補，確保在惡劣天氣影響能見度下仍具備可靠之預警能力。該系統已納入整體應變標準作業程序訊號傳遞流程，若偵測異常，告警訊號將同步傳送至列車端、監控端。

4.5 其他邊坡管理工作

除邊坡現地巡檢以及監測作業外，文書報表填列、分級審核之行政作業對於鐵公路邊坡轄管單位係一大負擔，故應用 AI 輔助文件彙整、資料分析、報告生成，做為邊坡安全評估及分級調整等工作之準備，以提升人員內業效率，是可考量 AI 切入應用之課題。

針對資料彙整部分，因目前鐵公路邊坡養護單位皆已建置邊坡維管系統或資料庫，為 AI 導入奠定了資料集基礎和自動化接口，潛在應用如：填報紀錄即時檢查與校正、內容智慧化索引和提取、以及資料產製和彙整等。AI 可以於人員匯入填報資料時，對內容進行一致性和合理性檢查，例如：與邊坡基本資料比對，確認有無座標與該邊坡場址里程編碼錯置、檢查量測數據有無逾合理值，或偵測重複性資料和圖像等，並提醒人員校閱。另因相關巡檢工作皆須照片記錄佐證，若資料持續交付 AI 訓練後，未來人員於系統上傳照片時，即可由 AI 影像判識輔助自動進行嚴重程度評分和分級，供人員參考。

邊坡養護手冊內容龐雜，對於單位新進人員需要一段時間才能熟悉，故能考量將整個手冊、評分準則、表單紀錄等資料數位化，人員在現場遇到疑問時，可以即時以行動應用程式向 AI 提問，並由其立即提供精確之規範引用和解釋，化身智慧助理，強化人才培育。

而針對例行舉辦之邊坡教育訓練，其目的為使邊坡業務相關人員對邊坡之維護管理、破壞機制、安全防災等有更全面性瞭解，並且能獲得與時俱進的邊坡相關知識。教育訓練教材與題庫可應用 AI 針對最新增修訂規範和手冊內容，自動更新、生成或修訂課程內容，並進

行重點彙整，為各類課程如邊坡巡查、地錨檢測、邊坡安全評估與分級等來生成測試題庫，俾使訓練成效提升。

然而，進行智慧化索引和提取及彙整和生成報告，必須讓 AI 模型讀懂人類語言(自然語言處理技術)，並藉資料中上下文之間脈絡及意義，使 AI 可自動閱讀非結構化文件，提取關鍵資訊，並能依照所下指令或稱提示詞(Prompt)，由生成式 AI 模型，例如：GPT(Generative Pre-trained Transformer)、Gemini 等來協助生成精準回答。

不同於 CNN 和 RNN 等分辨式 AI 模型，主要針對判斷或分類已存在之資料數據，生成式 AI 模型，應用場景多著重在「創造」內容，例如：對話、影像等，適合做為使用者工作流程個人化之工具，並提升效率及生產力。

2017 年由 Google 提出之 Transformer 模型即是以此目的而開發，後亦成為諸多生成式 AI 之基礎。Transformer 為一種採用「自注意力(Self-Attention)」機制之模型，即模仿人類對於一件事物或一段句子描述有輕重之分(例如：主詞可能是句型當中最重要)，而將注意力更多放在重要部分，並依照資料序列中不同之重要性來決定權重，故可避免像 RNN 在學習到後面資料時卻遺忘前面重要資訊的問題，亦不必逐步處理資料，Transformer 模型架構能夠一次性處理所有輸入資料，允許更多平行計算，並以此減少訓練時間，使模型能快速運行。

惟比起 CNN、RNN 等，Transformer 之參數量為它們的數倍之多，使其被稱為大語言模型(Large Language Model, LLM)，然而，隨著現今硬體效能的快速迭代，Transformer 模型架構被提出後，即掀起了一波生成式 AI 變革，也造就了各式能處理不同複雜任務之生成式 AI 模型被提出，最負盛名的即是由 OpenAI 公司於 2018 年發表之 GPT 模型，目前被廣泛應用之 ChatGPT 則是根據 GPT-3.5 系列模型進行微調後而成，現 GPT 已到第 5 代(如表 4-4)，包含 GPT-5、GPT-5 mini、GPT-5 Pro 等，提供使用者依任務需求和預算做選擇。

表 4-4 GPT 模型各版本比較

版本	發佈時間	簡介	應用場景
GPT-1	2018.6	<ol style="list-style-type: none"> 1. 利用 Transformer 解碼器架構 2. 以預訓練和微調過程進行訓練 3. 1.17 億參數 	基本的文本生成和自然語言處理任務
GPT-2	2019.2	<ol style="list-style-type: none"> 1. 無監督學習能力增強 2. 強化文本生成與連貫性 3. 15 億個參數 	文本及摘要生成、對話系統、機器翻譯等
GPT-3	2020.6	<ol style="list-style-type: none"> 1. 能執行多工任務 2. 生成與理解能力提升 3. 1750 億個參數 4. 衍生版本:GPT-3.5 和 GPT-3.5 Turbo 	文本及原始碼生成、文案撰寫、對話系統、問答等
GPT-4	2023.3	<ol style="list-style-type: none"> 1. 多資料型態處理能力(文字、圖像等) 2. 強化語言推理 3. 依照不同使用環境(如手機、邊緣設備)開發諸多衍生版本：GPT-4 Turbo、GPT-4o mini、GPT-4o 及 GPT-4.1、GPT-4.1 mini 和 GPT-4.1 nano 等 	艱澀對話系統、法律分析、多模態應用、資源受限的應用(如手機、邊緣設備)、跨語言對話系統、大規模商業部署、快速響應的應用，如虛擬助理、實時翻譯等
GPT-5	2025.8	<ol style="list-style-type: none"> 1. 最新之旗艦模型 2. 提升編碼、數學、寫作、健康和視覺感知等方面之表現 3. 衍生版本：GPT-5 mini、GPT-5 nano，以及付費的 GPT-5 Thinking 和 GPT-5 Pro 等 	同上並強化

第五章 結論與建議

本所配合交通部重大施政方針及支援各運輸系統技術與研發創新任務目的，於 111 年提出「多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探」2 年期計畫，並已完成多時期多尺度空拍影像(如衛星、航照、UAV)結合深度學習技術於公路邊坡地貌變異判識之適用性及應用性探討。113 年利用 UAV 結合 AI 進行落石型邊坡破壞特徵影像辨識之探討，藉以協助邊坡管理單位提升巡檢量能及效能，達成本所支援各運輸系統技術與研發創新之目標，並完成研析 UAV 結合 AI 深度學習影像判識方法。

今(114)年就過往研究基礎、實務單位建議及實際應用面考量，探討鐵公路邊坡分級制度結合 AI 輔助之可行性，梳理 AI 可輔助及減輕人力負擔之課題，俾實務單位能對現行制度結合 AI 之應用有初步擘劃，目前已完成(1)蒐集國內外 AI 於邊坡之相關研究文獻；(2)諮詢專家學者及訪談邊坡管理實務單位；(3) 鐵公路邊坡分級制度探討及資料蒐集；(4)邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討。

5.1 結論

1. 本計畫歸納 AI 應用於邊坡相關案例及研究，應用情境大致可分(1) 邊坡滑動風險評估及災害預測、(2)邊坡劣化辨識及結構弱面分析等兩類。而 AI 訓練用資料集亦相當多元，包含邊坡(含排水、護坡設施等)高解析度影像、空中和地表(底)監測儀器數據、空間特徵資料(如點雲模型、DSM、DEM...)、歷史災害紀錄、環境因子(如坡度、坡向、地質...)、驅動因子(如雨量、地震...)等。相關研究亦顯示 AI 利用多元資料進行學習，可達較好之效果。
2. AI 自資料蒐集、處理至模型挑選及後續工作之整體流程大致如圖 5.1，其中資料蒐集和處理耗費之時間人力最多，像資料儲存、清洗、整合、減量、格式轉換、標記等工作，然而，此為決定 AI 訓練成果優劣之關鍵。接著，從應用場景、資料數量、運行設備等進行綜合考量後選用相對合適之 AI 模型，並進行模型訓練、驗證及測試

等工作，最後利用相關指標驗證成果，以及進行模型參數微調。

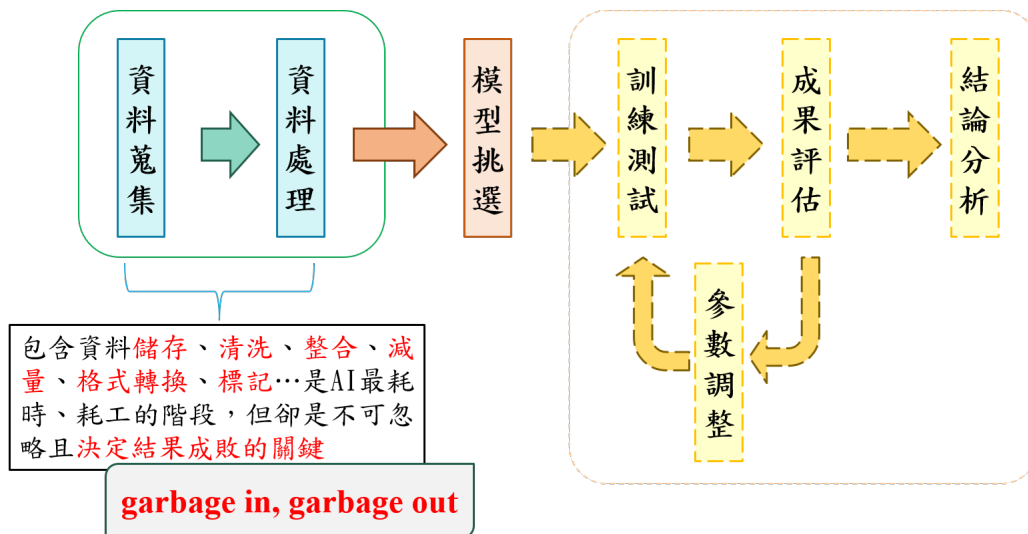


圖 5.1 應用 AI 整體流程

3. 有關鐵公路邊坡維護管理結合 AI 應用，邊坡巡查工作可考量由 AI 電腦視覺深度學習模型輔助之應用場景包含(1)項目判別及分類、(2)異狀判識及分類、(3)劣化標記及範圍量化、(4)分級輔助等。適用之 AI 模型：CNN、R-CNN、YOLO 等等相關處理影像判識、分類、物件偵測、語意分割和實例分割之模型。
4. 邊坡監測工作，可考量由 AI 時間序列深度學習模型輔助之應用場景包含(1)數據品質管(如：補遺、除錯等)、(2)異常偵測、(3)多變數關聯分析、(4)反推或驗證邊坡潛在之破壞模式、(5)警戒值和行動值等閾值訂定、(6)災害預測等。適用之 AI 模型：RNN、LSTM、GNN 等相關時序資料、空間資訊之多變數來源處理，並用於迴歸、預測之模型。
5. 運用 AI 大語言模型，結合前已建置邊坡維管系統或資料庫，減少邊坡內業之文書作業及行政流程、統一資料格式和除錯，以提升效率，並強化專業人員培訓工作，皆係 AI 可能切入應用之課題。

6. 針對上述結論，綜整現階段鐵公路邊坡結合 AI 深度學習輔助應用場景及主要優勢，如圖 5.2 所示。

AI賦能邊坡管理：提升安全與效率

傳統的邊坡維護依賴大量人工進行巡查與監測。導入AI技術，可自動化分析影像與監測數據，不僅能提升效率與判斷一致性，更能實現更精準的風險預測與高效的管理決策。

管理任務	AI應用技術	具體應用場景	主要優勢
 邊坡巡查	 電腦視覺 (YOLO, Mask R-CNN)	 自動辨識邊坡的裂縫、沖刷、植被覆蓋率，以及排水設施的破損與堵塞。	 提升巡查效率與判斷客觀性，並量化劣化範圍。
 邊坡監測	 時間序列模型 (RNN, LSTM)	 分析監測數據（如位移、水位），預測變化趨勢並偵測異常信號，找出多種儀器數據間的關聯性。	 實現災害預測，並可交互驗證數據，降低誤報率。
 安全預警	 智慧影像分析 (IVA)	 透過CCTV即時偵測落石、倒木等異物入侵軌道或道路，並自動觸發告警系統。	 提供全天候監控，縮短應變時間，提升行車安全。
 行政與訓練	 生成式AI (GPT, LLM)	 協助彙整報告、檢查數據、生成教育訓練教材，並化身智慧助理即時回答規範疑問。	 大幅減少內業文書工作負擔，加速新進人員學習。

資料來源：NotebookLM 生成

圖 5.2 鐵公路邊坡結合 AI 輔助應用場景及優勢綜整

5.2 建議

1. 本計畫列舉邊坡共通性之工作、項目及流程，結合 AI 之案例及情境，並提出較具泛用性之 AI 輔助應用場景，提供鐵公路邊坡轄管單位參採，建議相關單位可予以借鏡，發想自身 AI 運用。
2. 目前邊坡養護單位完成之邊坡巡查工作紀錄、各項表單，以及所蒐集大量影像、監測數據等皆保存於其建置之邊坡全生命週期管理系統或資料庫。而 AI 日新月異，大語言模型如 ChatGPT 已蓬勃發展，

使用者透過一問一答方式即能請 AI 協助判識影像、撰寫程式碼並建構專屬之 AI 模型等等，相較過往，專業門檻已降低不少，使用者僅需著重於資料之蒐集、品管、標註和處理等工作。故建議相關單位可盤點手頭上之數位化資料並進行梳理，後續針對自身需求、邊坡現況及所處場域交通狀況、資料來源和數量等，逐步進行智慧化加值應用。

3. 邊坡基本資料、分級判定、巡查紀錄、監測數據等皆屬機關內高度敏感之資料，不宜直接對外公開。因此，在佈署 AI 模型協助分析或預測時，需先進行資料敏感度分級，並提高資料外洩風險之認知。最安全的作法，是將 AI 模型佈署於單位自有機房或私有雲環境中，使所有資料僅在內部網路傳輸，不經過外部服務。如需即時偵測，也可考量在現場監測設備進行邊緣運算(Edge Computing)，僅回傳分析結果而非原始監測數據，以降低資料外流風險。
4. 承上，若因需求需使用外部 AI 資源並透過 API 存取時，則不應將原始資料直接送出，應由內部系統先行進行資料清洗、去識別化或匿名化處理，使外部 AI 僅能取得經處理後之資訊。此外，資料傳輸過程仍需搭配加密機制，以降低攔截風險。
5. 鐵公路邊坡結合 AI，特別是偏遠山區，其面臨之實際挑戰，如硬體計算能力限制、電源供應不穩定、無線傳輸頻寬不足、以及如何在惡劣氣候下保證系統的運行穩定性等等。相關課題建議鐵公路邊坡維護管理單位於發展自身 AI 應用時，皆須針對現地情況進行通盤規劃。
6. 承上，針對 AI 現地物件即時偵測及辨識應用場景，考量硬體計算能力限制，相關設備或行動裝置等建議優先採用 YOLO 等具備架構輕巧、計算速度快之 AI 模型。對於更複雜任務，則應根據預算與硬體環境選擇適當之 AI 模型，例如在邊緣設備上運行 GPT-4.1 nano 或 GPT-5 mini 等專為資源受限環境開發之衍生版本。
7. 邊坡災害發生前後，天候條件可能較為不佳，導致現地 CCTV 或其他影像擷取裝置之視距受影響，進而影響 AI 影像判識品質，人員亦因安全問題不易抵達現場進行查看。爰此，災前佈建相關告警系

統時，建議能採 AI 電腦視覺主動偵測與現地架設鋼纜、拉線或防護網構成之實體偵測迴路併行，當外物撞擊導致線路異常時即刻告警，與 AI 影像辨識形成互補，確保全天候可靠性。災中亦建議能搭配現場地面或地底監測儀器，利用 AI 整合多項因子進行時序預測，待同步達到異常閾值時再發出警報，以提升管理值可靠度。

5.3 成果效益與應用

1. 本計畫完成鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型應用之可行性探討，並提出鐵公路邊坡維管單位未來應用 AI 之建議。
2. 本計畫可做為本所 AI 技術研發後續相關研究探討與應用。

5.4 提供政府單位應用情形

研究成果提供鐵公路邊坡相關轄管單位，包含：交通部公路局、高速公路局、國營臺灣鐵路股份有限公司、臺灣高速鐵路股份有限公司及農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處等，於鐵公路邊坡管理及災防結合 AI 之應用參採。

參考文獻

1. Dai, X., Chen, J., Zhang, T., & Xue, C. (2025). Integrated Landslide Risk Assessment via a Landslide Susceptibility Model Based on Intelligent Optimization Algorithms. *Remote Sensing*, 17(3), 545.
2. Xu, J., & Zhang, Y. (2025). AI-Powered Digital Twin Technology for Highway System Slope Stability Risk Monitoring. *Geotechnics*, 5(1), 19.
3. Kong, M., Li, R., Liu, F., Li, X., Cheng, J., Hou, M., & Cao, C. (2023). Landslide Surface Displacement Prediction Based on VSXC-LSTM Algorithm. *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2023*, 456–470.
4. Nava, L., Carraro, E., Reyes-carmona, C., Puliero, S., Bhuyan, K., Rosi, A., Monserrat, O., Floris, M., Meena, S. raj, Galve, O. pedro, & Catani, F. (2023). Landslide Displacement Forecasting Using Deep Learning and Monitoring Data Across Selected Sites. *Landslides*, 20(10), 2111–2129.
5. Xiao, Y., Ju, N., He, C., Xiao, Z., & Ma, Z. (2022). Week-Ahead Shallow Landslide Displacement Prediction Using Chaotic Models and Robust LSTM. *Frontiers in Earth Science*, 10.
6. Beni, T., Nava, lorenzo, Gigli , giovanni, Frodella, william, Catani, F., Casagli, N., Gallegoar, J. I., Margottini, C., & Spizzichinoyusof, D. (2023). Classification of Rock Slope Cavernous Weathering on UAV Photogrammetric Point Clouds: The Example of Hegra (UNESCO World Heritage Site, Kingdom of Saudi Arabia). *Engineering Geology*, 325.
7. Wang, S., Zhang, zishan, Ren, yipeng, & Zhu , C. (2020). UAV Photogrammetry and AFSA-Elman Neural Network in Slopes Displacement Monitoring and Forecasting. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24, 19–29.
8. Wang, S., Zulkifl , A., Hashmi, M. Z., & Wang, P. (2019). Cliff Face Rock Slope Stability Analysis Based on Unmanned Arial Vehicle (UAV) Photogrammetry. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 5, 333–344.
9. Chen, Z., Zhang, Y., Ouyang, C., Zhang, F., & Ma, J. (2018). Automated

Landslides Detection for Mountain Cities Using Multi-Temporal Remote Sensing Imagery. *Sensors*, 18(3).

10. 交通技術標準規範鐵路類鐵路工程部，鐵路邊坡維護與管理規範，2024。
11. 國營臺灣鐵路股份有限公司，鐵路邊坡養護手冊(修訂二版)，2023。
12. 交通技術標準規範公路類公路工程局，公路工程施工規範，第五篇 隧道工程，第 02403 章 岩體分類與開挖支撐類型，2013。
13. 臺灣高速鐵路股份有限公司，台灣高鐵永續報告書 2023，2024。
14. 楊恒偉、吳思毅，高鐵邊坡安全管理、監測與告警系統，地質第 40 卷 3-4 期，54-59，2021。
15. 臺灣高速鐵路股份有限公司，台灣高鐵極端氣候下之天然災變預警機制，運輸安全資訊交流研討會簡報，2024。
16. 農業部林業及自然保育署，阿里山林業鐵路 114 年度安全管理報告，2025。
17. 章之嘉，阿里山林業鐵路沿線樹木傾倒風險及邊坡土壤沖蝕之評估研究，2021。
18. 農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處，阿里山林業鐵路邊坡養護手冊(初稿)，2025。
19. 交通技術標準規範公路類公路工程局，公路邊坡大地工程設施維護與管理規範，2022。
20. 交通部公路局，公路養護手冊，2023。
21. 交通部公路局，邊坡區域外水因素及坡頂人為開發列為 C+級邊坡作業指引，2023。
22. 交通部公路局，省道橋梁、邊坡安全管理與防災(含 0403 震後檢測)簡報，2024。
23. 交通部公路局，公路總局邊坡維護管理制度簡報，2021。
24. 交通部公路局，無人機於防災之應用分享與 AI 應用之展望簡報，2019。

25. 交通部公路局，科技技術應用於山區公路養護管理總結報告，2019。
26. 基能科技，智慧防災 4.0 公路防災四防線，108 年 737 次技術座談簡報，2019。
27. 交通部高速公路局，高速公路養護手冊，2023。
28. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2015). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
29. 乾坤測繪科技有限公司，埔里工務段、信義工務段優先關注邊坡光達應用暨進階檢測圖資建置計畫(第五期)，教育訓練簡報，2023。
30. 交通部公路局，三維數值模型在邊坡管理與科技防災之應用簡報，2023。
31. 農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處，阿里山林業鐵路極端氣候下天然災變鐵道預警機制，運輸安全資訊交流研討會簡報，2024。
32. 交通部公路局、國立陽明交通大學，微地動偵測邊坡滾落石事件：告警與預警之研究發展、實際應用及面臨的挑戰簡報，2024。

附錄一

專家學者及實務單位諮詢紀錄

1. 台灣高速鐵路股份有限公司 王景平副理

時間：114 年 7 月 16 日(星期三)上午 10 時~11 時 30 分

地點：高鐵臺中站

紀錄：黃宇謙 副研究員

壹、計畫緣由說明：(略)

貳、重點紀要

一、據悉貴公司委由中華民國大地工程學會協助「高鐵邊坡維護與管理手冊」之編訂，請問目前編修情形如何？預計何時始核定執行？

交通部鐵道局委託中華民國大地工程學會協助修訂「鐵路邊坡維護與管理規範」，並於 113 年 12 月由交通部核定後頒布。為符合前揭規範規定鐵路機構應編訂適用之鐵路邊坡養護制度、規章、專章或養護手冊，本公司亦委託中華民國大地工程學會協助修訂「高鐵邊坡維護與管理手冊」，現已完成相關編修工作，並進行規章頒布及核備(交通部鐵道局)作業中。

然而，該手冊為彙整本公司過往邊坡相關維護管理作業之內部規範，並配合相關規定新增章節，例如：路權外邊坡維護管理關注範圍之觀測，本公司針對邊坡之檢查、檢測及監測等工作皆持續辦理，並無因手冊尚未核定而中斷。

二、貴公司於邊坡全生命週期工作中係如何進行各課室間的分工？

本公司主要邊坡權管課室為土木結構維護課及大地工程課，主要之分工模式為土木結構維護課辦理年度定期檢查，及颱風、豪雨、地震達啟動標準時的不定期檢查作業，並進行相關維護改善工作。大地工程課則委請專業技術顧問依邊坡分級進行不同頻率之專業檢查作業(C 級邊坡(含)以上為 1 年一次、D 級邊坡為 3 年一次)，並就評估具有異狀徵兆之邊坡啟動特

別檢查(如鑽探及地球物理探測、穩定性評估等)，並規劃辦理預防性改善工作，此部分亦委由專業技術顧問協助進行相關工作。

本公司除進行邊坡及相關設施外觀之檢查外，尚有路權外邊坡維護管理關注範圍之觀察(主要應用遙測技術進行)，地錨之檢測、地滑計和傾斜管等儀器之監測等工作。

三、依貴公司目前編定之「高鐵邊坡維護與管理手冊」邊坡分級和相關步驟及流程大致為何？

針對邊坡分級，會先由人員進行邊坡現地踏勘，並依相關表單檢查項目實施專業檢查，綜整災害潛感因子等邊坡基本資料，針對影響程度低到高進行判別，進行初步分級(分為 Ai、Bi、Ci 及 Di 級)。

接著透過邊坡檢查、監測及地錨檢測 3 項之成果，輔以高鐵邊坡風險規模評估與邊坡分級方法進行綜合評估後研判分級(分為 A、B、C 及 D 級)。本公司邊坡總計有 389 處，皆為人工邊坡，破壞模式多係淺層坍塌，再經由整治手段及施工補強後，目前並無 A 和 B 級之高風險邊坡。

四、據悉貴公司於邊坡科技防災上，有建置邊坡自動化監測系統及天然災害告警系統(DWS)，並持續升級自動化監測站，針對科技應用於邊坡防災、巡檢及養護管理貴公司有何擘劃及展望？未來發展重點為何？

「天然災害告警系統(DWS)」為本公司於土建時期即建立，於隧道口上方、正線上方或鄰近正線之平面道路、敏感地質邊坡等較高風險路段進行偵測器佈設，當因地震、異物入侵、邊坡滑動、落石等，造成任一位置斷線將作動告警並觸發「自動列車控制系統(automatic train control system, ATC)」發送停車指令停駛列車，以確保營運安全，並交由相關管理單位前往現場進行查看及災害排除。

本公司目前在自動化監測系統方面，主要以地滑計、地下

水位計、土中傾度管、結構物傾斜計與 IoT 監測站(傾斜監測桿、土壤溼度計)等來進行邊坡穩定相關數據回傳及蒐集，並以邊坡監測站之雨量計與中央氣象署發佈之降雨資訊為暴雨預警依據。目前本公司發展之暴雨預警模式，以長降雨延時(24 小時累積雨量)及強降雨(3 小時平均時雨量)做為指標，並設定警戒值和行動值。當暴雨預警或地滑計、傾斜監測桿監測數值碰觸管理閾值時將啟動相應之應變作為。本公司目前亦逐年增加沿線 CCTV 之設置以達遠端監看功能。

五、依貴公司實務經驗，對於邊坡之維護管理與防災，AI 從何處切入較具實務應用效益及可行性？

本公司針對 AI 於邊坡相關之應用情境有以下之擘劃，提供參考：

- (一)本公司將介接中央氣象署「新一代劇烈天氣監測系統(QPEPlus)」，以提升自動化監測及暴雨預測之涵蓋範圍，未來將蒐集更多數據，並交由 AI 歸納並強化預警模式，可讓警戒值和行動值更趨精確。
- (二)本公司已建置邊坡自動化監測系統來蒐集各項監測數據及災害資訊，而在多變數監測數據與邊坡穩定性關聯性之態樣辨識、趨勢預測上有機會由 AI 進行評估，提供更精確預警功能及即時應變建議。
- (三)利用高鐵沿線設置之 CCTV 取得影像，並將影像輸入 AI 大語言模型(large language model, LLM)，透過持續問答及學習，可協助行控中心及相關人員預先進行現場狀況判釋。

2. 阿里山林業鐵路及文化資產管理處 連祥益技正

時間：114 年 9 月 12 日(星期五)下午 2 時~4 時

地點：阿里山林業鐵路及文化資產管理處

紀錄：黃宇謙 副研究員

壹、計畫緣由說明：(略)

貳、重點紀要

一、請問貴處邊坡維管手冊目前編撰進度為何？

本處編修之「阿里山林業鐵路邊坡養護手冊」於 114 年 8 月 29 日完成初稿，目前針對手冊內容辦理修正補充，務求簡潔明確，以利現場人員快速操作，主要修正項目內容如下：

- (一)分工明確：清楚界定道班、專業顧問公司及本處之角色與責任分工，避免責任模糊。
- (二)巡檢清單化：各項檢查項目應表格化，檢查內容、紀錄方式及照片佐證須一致，確保執行標準化。
- (三)風險處置：依各項風險訂定對應處置措施，包含列車減速行駛、即時停駛及短中長期作為。
- (四)檢查與數據具體化：明訂巡查與檢測頻率、各項管理值及觸發應變機制，並建立歷時資料庫，以供持續追蹤。

二、請問貴處邊坡維管手冊所訂定之邊坡分級制度為何？能否協助簡要說明邊坡分級之準則及办理流程？

邊坡分級經由現地巡查邊坡現況(坡面、穩定設施、攔石柵、排水設施、路基)及既有資料比對(坍滑或崩塌潛勢及活動性、監測結果、近 5 年內歷史災害、補強工程、影響範圍等)後，將各路段依風險等級由高至低分為 A、B、C、D 四個等級(如下表)。後續依據新增災害與治理工程紀錄每 2 年滾動調整

邊坡風險分級。

邊坡分級	狀況說明
A	有明顯不穩定或劣化情形且有影響行車之疑慮
B	疑似不穩定但並無立即影響行車安全之疑慮
C	未發現明顯不穩定且無行車安全疑慮
D	穩定狀況且無行車安全疑慮

沿線目視巡查包含對於自然邊坡、大地工程設施與監測設施檢查項目等，主要分成五大項目，各項調查目標說明如下：

- (一)坡面：坡面裂縫、鼓起、沖刷、滲水等現象。
- (二)穩定設施：構造物裂縫、傾斜、鋼筋外露、基礎掏空、異常滲漏、錨頭異常...等現象。
- (三)攔石設施：材料銹蝕、破損、彎曲、變形、支柱異常情況、落石堆積情形。
- (四)排水設施：排水設施之斷裂、破損、堵塞、淤積、沖刷等現象。
- (五)路基：道碴情況、噴泥現象、枕木、防落護欄劣化狀態。

三、請問貴處目前所轄管之邊坡總數量為幾處？以及不同分級之邊坡數量各為幾處？不同風險分類之邊坡有何應對作為(巡查頻率、監測儀器設置需求等)？

針對邊坡劃分，以現場邊坡形式、地形、上下邊坡擋土型態、該路段鐵路線型及前後路段結構物(橋梁、隧道)為考量，每一檢查單元以路線線形、斷面種類及每段不超過 250m 為原則進行分段，故目前林鐵全線(包含主線 322 處、祝山線 6 處、眠月線 56 處及水山線 6 處)總共分為 399 檢測單元(處)。並有邊坡分級：A 級 65 處、B 級 77 處、C 級 125 處、D 級 132 處。

本處 A 級邊坡，依照破壞類型、現況緊急程度、影響鐵路程度、路線線型與位置等，再細分為 3 個順位(A-1、A-2、A-3)，並視破壞類型、預算分配、管理能量及改善順位排序，決

定優先進行補強作業或施以監測系統等對應措施，分年分期改善。總結本處邊坡分級(含因應對策)如下表：

等級	分級意涵		因應對策		
			管理手段	工程改善	
A 級	<u>有明顯不穩定或劣化情形且有影響行車之疑慮</u>	A-1	<ol style="list-style-type: none"> 1.監測結果顯示滑動位置、趨勢明確者。 2.有大規模、中小型崩塌潛勢且巡檢發現土砂災害徵兆明顯。 3.每日車次頻率高，列為優先修繕路段。 4.車廂翻落風險高之路段。 	建議 A 級邊坡於工程改善完成前，由維管單位加強巡查(如：朝巡、特別巡查...等)，並觀察劣化狀況發展性，以利即時做出災害反應	應視破壞類型、預算分配、管理能量及改善順位排序優先進行補強作業或施以監測系統...等對應措施
		A-2	<ol style="list-style-type: none"> 1.位在彎道或隧道口附近，火車行駛時視線不良者。 2.有二次災害或邊坡土砂災害範圍擴大可能者。 		
		A-3	<ol style="list-style-type: none"> 1.既有擋土牆裂縫發展性待確認者。 2.坡長較短、土砂災害影響範圍較小者 		
B 級	<u>疑似不穩定但並無立即影響行車安全之疑慮或無開放通車者</u>		建議加強巡查，並視不穩定情況之發展性或林鐵政策調整，進行級別調整	X	
C 級	<u>未明顯不穩定且無立即影響行車安全之疑慮</u>		建議進行例行性巡查或設施例行性維護	X	
D 級	穩定狀況		進行日常巡查	X	

四、請問貴處目前設置之邊坡監測儀器種類為何？

本處目前在監測儀器設置，以測傾管、水位(壓)井、沉陷點、傾度盤、地滑計、雨量筒、地錨荷重計及裂縫計為主。其中，測傾管、沉陷點、傾度盤訂有監測管理值如下表：

監測儀器	注意值	警戒值	行動值
測傾管	5mm/月	10mm/月	>10mm/月
沉陷點	20mm	50mm	>50mm
傾度盤	412 秒(1/500)	573 秒(1/360)	825 秒(1/250)

上表各項管理值之意義及因應對策如下表：

管理值	注意值	警戒值	行動值
意義	當觀測值大於注意值，表示邊坡已略有不穩定之徵兆	當觀測值大於警戒值，表示邊坡已有不穩定之徵兆	邊坡或擋土設施已發生位移或已瀕臨破壞
因應對策	密切注意其後續監測變化趨勢，是否有持續變位發展	通知相關機關並更密集的觀測與巡檢頻率監測	觀測值有明顯變位現象，立即通知相關機關，如有破壞跡象應立即進行人員疏散

五、請問邊坡監測系統之數據除回傳至行控中心，以提供現地資訊外，貴處目前或未來是否有其他加值應用規劃(例如：發展預警模式等)？

本處目前尚在設置基礎監測設施(如光纖)，待建置完成時考慮納入之加值應用如下：

(一)數據應用、趨勢預測與模式建立：

- 1.利用測傾管、傾度盤、沉陷點、地滑計、水位井等數據資料，建立邊坡變形臨界值。
- 2.結合裂縫計、地錨荷重計、傾度盤等數據資料，對擋土結構、支護系統或隧道邊坡進行安全性評估，並判斷是

否需要補強或施工調整。

3. 整合雨量筒、水位井及邊坡變形數據，分析降雨強度、累積雨量與滑動行為的關係，形成降雨—邊坡變形聯動預警模式，提前預測降雨可能引發之邊坡活動。
4. 對歷史監測資料進行統計，分析邊坡位移、沉陷速率、水位變化等趨勢。
5. 建立預測模型，估算未來滑動可能性、滑動速率與潛在破壞時間。

(二)預警與告警系統

1. 當監測數據超過設定值時，自動觸發警報(聲光、簡訊、APP 通知)。
2. 利用沿線光纖設備即時將監測數據傳送到行控中心，以遠端掌握邊坡安全。

六、請問除了地面及地底監測設備外，是否有運用空中遙測技術如：無人機、空載光達、衛星、InSAR 等，進行邊坡之現況或災害調查？

(一)無人機(UAV)：可快速、安全獲取邊坡影像與三維地形資料，量測變形、偵測裂縫，並支援風險評估與預警管理。本處目前各監工區至少有一位同仁擁有無人機證照，總計約有 3~4 名飛手可進行以下飛航任務：

1. 快速現場巡查與地形拍攝：針對難以接近或危險的坡面，短時間內拍攝整個邊坡或工程區域的高解析度影像，減少人員現場巡查風險。
2. 裂縫與崩塌區域拍攝：UAV 捕捉地表裂縫、崩塌體積或裸露岩層，以輔助地面監測儀器。
3. 降雨與滑動前後快速評估：雨後或地震後，即時拍攝邊坡狀況，快速掌握潛在危險區域。

(二) 空載光達(Airborne LiDAR)：主要目的是快速、精準獲取邊坡大範圍三維地形資料，用於變形監測、危險區域判定及防災預警分析。本處依邊坡需要，委外專業廠商進行以下飛航任務：

1. 高精度地形與坡面建模：利用 LiDAR 獲取高密度點雲資料，生成精確數位地形模型，並可量測坡面高程、傾斜與曲率，提供邊坡變形分析基礎。
2. 輔助危險區域偵測：精密點雲可偵測地表裂縫、滑動跡象、崩塌或裸露岩層位置，協助判斷潛在滑動面及高風險區域。

七、請問今年委託辦理之採購案，是否延續前期 CCTV 結合 AI 辨識之成果繼續發展？若是，請問有何欲精進之處？若非延續前期計畫成果，請問兩者有何不同之處？後續係規劃兩套辨識系統併行嗎？

(一) 前期 CCTV 影像辨識系統：

本處自 110 年向經濟部中小企業處「新創採購—政府出題·新創解題」提案，開發落石監測儀器及告警系統等自動化監測產品，設置於上邊坡落石潛勢高且列車行駛視線不佳路段(彎道、隧道進出口處)，並於路線前後二側設置落石警示燈號，提供列車司機員減速或煞車之參考，並將資訊回傳至本處。

111 年克服山區軌道沿線無市電及網路之限制，應用 AI 影像辨識技術，透過網路傳輸現場影像，以直覺式判釋軌道遭遇邊坡落石或異物入侵，並整合現場告警系統，正確提供列車司機員提前煞車之資訊，降低災害風險發生可能性。

AI 影像辨識技術，相較直接接觸式落石告警，大幅降低施工與設置費用，免設置防落石柵，便可透過攝影機結合 AI 辨識軟體進行邊坡落石告警。未來林業鐵路光

織佈設完成後，可透過此影像辨識進行全面軌道安全監測，達到更快速、穩定之辨識效率。

(二)114 年阿里山林業鐵路 AI 辨識輔助偵測告警系統

本處於今年 5 月 8 日委託辦理 AI 辨識輔助偵測告警系統案，預計執行 2 年期，以下為欲達成之工作項目及目標：

1. 快速辨識軌道滯留物：透過 AI 辨識、物聯網、或其他可行之技術，快速辨識監控軌道區域(30 公尺 x 30 公尺)中，可能影響行車安全的滯留物(異物)等異常情況。
2. 輔助告警及回傳資訊：當系統偵測到潛在威脅時，於軌道上、下行二側之列車足以反應處置之適當距離啟動告警牌面，並同時將相關影像和數據傳送至監控平台和管理人員群組。
3. 降低人力巡查成本：透過 AI 辨識技術，進行科技巡檢縮減人力巡查頻率並同時兼具提升災害告警的即時性和準確性，本案設定達成之辨識率為 95%。

八、除上述正執行之 AI 相關計畫，依貴處實務經驗，未來 AI 可以協助解決之邊坡相關問題為何？以減輕貴處人力負擔、提升效率。(舉例如：(1)蒐集邊坡張力裂縫影像後，過往由專業人員進行判識，未來能交由 AI 輔助判識；(2)自動化監測系統蒐集之資訊，未來能交由 AI 協助進行分析、歸納並加以預測災害...等等)？

(一) 邊坡變形預測與風險評估：利用歷史監測資料(測傾管、傾度盤、沉陷點、地滑計等)，建立 AI 機器學習或深度學習模型，用以預測邊坡位移、滑動速率，提前識別可能滑動之邊坡區域，支援施工或防災決策。

(二) 降雨—地滑關聯分析：結合雨量筒、水位井資料與邊坡變形資料，透過 AI 建立降雨觸發滑動模型，將降雨資

料轉化為邊坡潛在滑動警示及早期預警，降低災害風險。

- (三) 空拍影像及數位模型應用：整合無人機影像、空載光達、衛星影像，使用 AI 自動分析邊坡裂縫、崩塌、沉陷等現象，減少人工巡檢成本與危險性，或自動化檢測崩塌或裂縫區域，提高監測效率。
- (四) 異常偵測與即時預警：AI 學習邊坡正常且穩定之變化模式，偵測異常變化並自動告警，俾啟動應變措施，減少災害發生。

附錄二

專家學者座談會會議紀錄

交通部運輸研究所運輸技術研究中心會議紀錄

壹、會議名稱：本所運技中心第一科 114 年度自行研究計畫專家學者
座談會議

貳、時間：114 年 5 月 12 日(星期一)上午 9 時 30 分

參、地點：本所運輸技術研究中心 2 樓簡報室

肆、主持人：蔡立宏主任

紀錄：鄭登

鍵

伍、出單位及人員：如簽到表

陸、與會委員意見：

一、吳委員松旺

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保 護成效評估及技術推廣

1. 本工法適用於如大甲溪此類卵礫石河床，而臺灣的河川環境及地質具多樣性，在感潮區河川、泥砂或泥岩等環境是否可用其他的方式來保護橋基，建議後續可規劃針對相關的場域下橋基保護之研究。
2. 建議可建立本工法之 SOP 做為施工說明書，提示施工細節、步驟，以利後續推廣執行。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

目前箱內檢測還是以人力為主，無法用機器取代，本工務段可安排本案研究人員參與箱內檢測作業，實際參與執行體會實務困難及盲點。

(三) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

本工務段轄區國道 3 號竹南西至後龍段，因近海盤式支承鏽蝕嚴重，目前預計以手動或噴砂方式除鏽，若有研究參考需求可安排至現場案例蒐集。

二、柯委員永彥

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保

護成效評估及技術推廣

1. 現場驗證使用 UAV 進行拍攝，如何針對水下沖刷部分進行觀察？
2. 本研究大甲溪河床屬於卵礫石，若針對不同性質之河床應如何調整或可直接適用？建議後續規劃相關延續性之研究。
3. 本研究建議可將計畫施作經驗回饋修正，如於現場工法之最佳配置、注意事項、步驟等補充說明。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

橋梁檢測方法相當多，包涵目視檢測及非破壞性檢測，建議透過訪談及現場觀摩，聚焦於實務需求。

(三) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

本案之研究場域是否有機會擴增至離岸風電之範圍？

(四) 港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

港灣構造物之管理相當重要，本研究今年度為最後一年，建議後續研究可從巡查檢測提升到監測，可節省人力並獲得更全面之資料。

(五) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

本研究今年做花蓮港即可蒐集 2018、2024 年震災之案例，做實際案例之對照。

(六) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

本研究可與臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查研究搭配，將 RC 構件佈放於各實驗場域做測試。

三、林委員健明

(一) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 須因應氣候劇烈所生颱風豪雨，造成既有排水設施無法消退之積水及淹水。

2. 因應船舶大型化，碰墊規格尺寸需變大，是否影響碼頭結構？

(二) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

碼頭水下構造物為鋼板樁或鋼管樁結構，海水腐蝕劣化因子是否有針對各港海氣候條件分別研究？

(三) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 本研究為 5 年期研究之第 4 年，相關的資料蒐集，主要以生成式 AI 蒐集國內外液化評估之文獻，請注意 AI 工具使用之實際性。
2. 花蓮港於 113 年 0403 地震中受創嚴重，相關研究資料陸續產出，請貴中心針對潛勢液化高之碼頭，提出具體建議以減少地震所帶來之災損。

四、王委員朝正

1. 8 個計畫含括基本資料建立、資料運用方法及管制檢測技術評估與應用，符合運技中心設立之目的。
2. 建議研究成果每年發表，依查核點審查並分享研究成果。
3. 建議貴中心持續讓工作同仁接受 AI 之相關訓練。

(一) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

碳鋼及鋅去年已建立關聯性，建議今年成果能帶入進行確認，並進行 AI 學習。

(二) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

鋼筋混凝土之劣化，鹽份、水份不可或缺，但若水量夠大是能沖掉鹽份，建議水量、時雨量及次數列入參數。

五、楊委員秉順

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 橋基沖刷涉及河床質種類、河床斷面、河床高程、基礎形式等狀況有不同影響，本案經歷多年試驗與現地驗證

具有效益性，建議可載明本案適用性範圍。

2. 可研議採用檢核表方式，對於有橋基沖刷之機關，只要針對檢核表內容勾選，即可知道是否可採用本方法，並於表中針對不同狀況提供織布配置建議方式，以方便依循。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 目前箱內檢測面臨人員安全、設備限制，狀況甚多，建議可先針對不同箱內情況了解。
2. 因為箱內狀況不同，有混凝土橋、鋼構，且隔梁人孔有管線或是箱內有錨頭等狀況甚多，建議後續歸納各種狀況之適用性方式。
3. 無管線、阻礙物或高低差等影響隔梁人孔之箱內環境，可研議採自動軌道之可行性。
4. 如屬較複雜有阻礙物之箱內環境，可研議採人員先蒐集箱內高解析之照片與影片，事後採用影像標註及檢測評分等方式可行性，減少人員停留時間。

(三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

本草案有規範相關土壤液化計算方式，建議可研議將港區地震液化風險評估模式精進等相關案例納入。

(四) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 邊坡情況甚多，有落石、土石流、倒懸、危木或節理開裂等問題，建議收集資料後先研擬預計 AI 判釋之方向。
2. 以公路局而言，RHRS 已有相關檢核表與評分機制，未來如能導入 UAV 等自動判釋相關邊坡分級數值，將可迅速分類。

(五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 本案歷年對於橋梁設計具有相當的助益，惟目前僅能以腐蝕等級由設計單位採用膜厚設計或耐久性設計等考量，建議本案後續可建立各區域相關設計參數，讓設計單位更能直接採用。

2. 因關渡橋與未來淡江大橋皆位於淡水河出海口，建議可於該處新增相關試驗。

(六) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 目前採用 4 種不同溫室氣體情境來研究鋼筋腐蝕速率模型計算，未來於不同現地上如何採用相關設計參數？
2. 本案提及選取一座鋼筋混凝土橋梁評估鋼筋腐蝕，是否已有選定？未來如何與模型相互驗證？

六、李委員坤哲

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 沖刷因子涉及流量、水深、福祿數、河床質..等等，本案目前採大甲溪案例，未來可擴充其他條件下之探討，如砂土、粉土質粒料，並據以調整織布，提升保護工耐久性。
2. 建議後續年度如繼續執行，可增加沖刷計算與水工試驗及現地試驗之比較，可推求不同條件下之成效。
3. 水利機關近年有辦理大甲溪疏濬工程，請注意地形及流況改變之影響。

(二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 目前橋梁箱內檢測時，人員進出人孔之墜落風險及箱內局限空間為高風險等級。
2. 國內之前嘗試過之案例包括 UAV、Lidar、橋梁檢測機器人，因箱內構件複雜、管線遮蔽物、人孔位置不一、定位等困難，有諸多問題待克服。
3. 本案研究員後續將實際進入箱內查訪，對發掘問題及工具之開發應有極大幫助。

(三) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

目前邊坡主管單位之邊坡分級制度有定性及定量兩部分，其分級需要大量人力進行資料之判讀及更新，如能在適當點導入 AI，並配合邊坡監測系統，將對邊坡預警及防災大有裨益。

柒、結論：

感謝各位委員提供本所相當寶貴之專業建議，請案關業務同仁將委員意見納入參採，以符合實際應用面，並提升研究成果之廣度及實用性。

捌、散會：上午 11 時 30 分

會議簽到表

壹、會議名稱：本所運技中心第一科 114 年度自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：114 年 5 月 12 日(星期一)上午 9 時 30 分

參、地點：本所運輸技術研究中心 2 樓簡報室

肆、主持人：蔡主任立宏 蔡立宏

伍、出席單位及人員：

所外委員	簽名
林委員健明	<u>林健明</u>
楊委員秉順	<u>楊秉順</u>
吳委員松旺	<u>吳松旺</u>
柯委員永彥	<u>柯永彥</u>
李委員坤哲	<u>李坤哲</u>
王委員朝正	<u>王朝正</u>
第一科	<u>賴瑞博</u> <u>張道光</u> <u>曾文齊</u> <u>顏震香</u> <u>王瑞萍</u> <u>鄭建</u> <u>賴俊呈</u> <u>黃子強</u> <u>謝妙屏</u> <u>黃煜辰</u>
第二科	<u>李信穎</u>
第三科	<u>林雅雯</u>

附錄三

第 1 次工作會議紀要

114 年 6 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第
1 次工作會議

時間：114 年 6 月 30 日(星期一)上午 10 時至 13 時

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護
成效評估及技術推廣

1. 相關三維數值水理分析文獻資料之蒐集。
2. 本工法施工說明書撰擬、現場觀測執行及三維數值分析模型建置情形。
3. 階段性成果應用說明。

(二)橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 國內橋梁箱型梁結構型式分類介紹。
2. 橋梁箱內檢測規定及實務問題說明。
3. 6 月專家學者諮詢及實務單位訪談內容說明。

(三)港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 彙整及回顧臺灣港灣構造物設計基準發展歷程。
2. 彙整及回顧日本「港灣の施設の技術上の基準・同解説」之變遷。
3. 調查及蒐集「港灣構造物設計基準(草案)」所參考引用國內外標準或規範之最新版本。

(四)鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 已蒐集之國內外 AI 於邊坡相關研究文獻說明。
 2. 專家學者諮詢及實務單位訪談規劃。
 3. 國營臺灣鐵路股份有限公司邊坡分級制度介紹。
- (五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究
1. 完成第 1~2 季大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗工作，持續辦理第 3~4 季工作。
 2. 完成出版年報與辦理研習會工作，後續工作重點在進行銅金屬關聯性分析工作。
- (六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業
1. 各港區其他設施之巡檢項目與維護管理制度彙整與研析。
 2. 其他設施常見之劣化項目探討。
- (七) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進
1. 彙整液化評估法相關文獻，並蒐集花蓮港及安平港近 10 年新建工程所增加之地質鑽探資料。
 2. 初步完成花蓮港及安平港地質鑽探資料盤點。
- (八) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響
1. AR6 統計降尺度資料之篩選及資料處理流程。
 2. 鋼筋混凝土腐蝕劣化評估模型之選用。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

- (一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣
1. 討論所蒐集文獻之適用性。
 2. 三維數值模型分析流程與可列入檢定及驗證事件探討。
- (二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估
1. 依橋梁箱型梁結構分類，討論橋檢輔助工具之適用模式。
 2. 專家學者諮詢及實務訪談所蒐集之橋檢實務問題討論。

(三)港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

討論本案盤點檢討「港灣構造物設計基準(草案)」參考引用國內外標準或規範之最新版本及取得的情形。

(四)鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 蒐集文獻有 AI 結合數位孿生此類較為新穎之整合應用，建議針對目前 AI 於邊坡之新應用案例加強蒐集，以做為未來研究課題之發想。
2. 建議持續前往案關單位進行諮詢，以瞭解實務運作及 AI 應用所在。

(五)114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 討論關聯性研究的建模數據、主要影響因子、依區域特性建模等相關課題。
2. 討論水下試片取樣分析與研究重點。

(六)港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

1. 討論其他設施維護管理機制、巡查檢測項目與劣化判定標準。
2. 討論各港之其他設施構件劣化項目。

(七)港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 討論 111-113 年成果與港灣構造物維護管理系統介接的內容。
2. 討論後續報告內容的加強與補充。

(八)氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 選用之腐蝕劣化評估模型於臺灣地區的適用性。
2. 既有文獻上其他腐蝕劣化評估模型之差異性。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

- (一) 高公局大甲工務段已於今年汛期前採用本工法完成 P25L~P26L 橋基保護工作，並已據此完成今年度現場試驗區第 1 次 UAV 觀測航拍記錄初始地形，後續請持續注意降雨情形適時進場拍攝，以及注意航拍活動申請之期限。
- (二) 三維模型建置驗證事件之選取，考量降雨量、石岡壩放流量、試驗區影響性及觀測資料完整性，可採 113 年凱米颱風事件。

二、橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

- (一) 建議增加橋梁箱內檢測之檢測項目相關論述，以利聚焦並評估橋檢工具應具備之功能及實用性。
- (二) 建議報告蒐集並統計呈現各種類箱型梁之數量，以利評估未來橋檢工具研發之效益。

三、港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

- (一) 有些標準或規範需要付費購買才能取得，建議先以已經蒐集取得的最新版本之標準或規範進行盤點檢討。
- (二) 有關本計畫鈞長提示：「港灣構造物設計基準複審一案，涉及原提報交通部複審時未納入之新增議題，惟該等議題尚未經初審即納入複審程序，為確認其程序之適切性及實務可行性，請與綜合規劃司研商後續處理方式。」在經與綜合規劃司討論後，其建議先進行盤點，俟盤點後評估修訂內容多寡，再決定逕行辦理複審作業，還是交通部函文將基準(草案)退回本所，重新辦理基準編修及初審作業。故請於 8 月 31 日前，提供盤點資料予綜合規劃司參辦。

四、鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

- (一) 建議後續再持續蒐集臺灣高速鐵路股份有限公司(簡稱高鐵公司)及農業部林業與自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處(簡稱阿里山林鐵)邊坡分級相關規定，以做相互參照比較。
- (二) 應依照本計畫研究目的及對象，逐步收斂課題、以終為始，故建議初步蒐整鐵公路邊坡分級制度後，應歸納並分類出適合

AI 介入輔助之情境，俾後續提供實務單位參考應用。

五、114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

- (一) 後續可分區進行關聯性分析，探討臺灣不同大氣環境、不同腐蝕因子特性區域間的腐蝕差異性。
- (二) 後續可比較各年期、各港區水下金屬腐蝕差異性，以及水下金屬腐蝕與腐蝕因子間的關聯性。

六、港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

- (一) 統計並分類各個港區其他設施構件之劣化項目，以瞭解設施常見損壞構件，提供後續設施維護之參考數據。
- (二) 建議再加強蒐集新興科技可應用在其他設施的巡檢作業案例。

七、港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

- (一) 請提供歷年各港液化相關研究成果予港灣設施維護管理系統介接，提供臺灣港務股份有限公司未來的應用。
- (二) 今年度進行花蓮港及安平港模式精進，建議運用國內、外的液化分析方法，推估花蓮港及安平港液化範圍及震陷量，提供地震速報簡訊之應用。

八、氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

- (一) 建議測試比較不同腐蝕劣化評估模型之差異。
- (二) 建議搜尋是否有臺灣本土的相關溫度及濕度等修正因子試驗資料，以利建立臺灣本土之修正因子。

附錄四

第 2 次工作會議紀要

114 年 8 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第
2 次工作會議

時間：114 年 8 月 28 日(星期四)上午 9 時至 12 時 40 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護
成效評估及技術推廣

1. 文獻資料蒐集及本工法施工說明書撰擬說明。
2. 數值分析流程及三維數值分析模型檢定與驗證情形說明。
3. 階段性成果應用說明。

(二)橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 蒐整橋梁箱內部檢測之檢測項目及缺失樣態說明。
2. 箱梁內部檢測作業現地觀摩內容說明。

(三)港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 初步盤點並檢討草案內容。
2. 與臺灣世曦工程顧問股份有限公司討論盤點結果及後續編
修方向討論。

(四)鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 蒐整國內外 AI 應用於邊坡相關研究文獻。
2. 實務單位訪談紀要說明。
3. 我國鐵公路邊坡分級制度現況說明。

- (五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究
1. 完成第 1~2 季大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗工作，持續辦理第 3~4 季工作。
 2. 初步完成銅金屬關聯性分析工作，後續將持續精進與優化模式。
- (六) 港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業
1. 探討各港區其他設施經常及特別巡查設施之劣化項目。
 2. 無人機與行動應用程式應用於其他設施巡檢作業。
- (七) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進
1. 建置花蓮港及安平港地質鑽探資料，並盤點、篩選液化風險評估可用資料，花蓮港共 36 筆、安平港共 193 筆地質鑽探資料。
 2. 完成不同地震情境下液化潛勢比較。
- (八) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響
1. 氯離子擴散係數之溫度及時間影響修正。
 2. 需考量鹽害影響縣市之使用年限損失比較。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

- (一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣
1. 文獻引用資料之適用性。
 2. 三維數值模型檢定與驗證情形，及後續可列入模擬分析之事件探討。
- (二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估
1. 依不同箱內環境適用之檢測輔助工具模式討論及比較。
 2. 國外箱內檢測技術應用及現地試驗成果文獻討論。
- (三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 討論初步盤點檢討之結果，特別針對氣候變遷對於港灣影響，草案所參考引用之國外規範，於更新之版本皆已修訂相關方針、措施及策略等來調適因應。後續草案辦理修訂時，建議參考更新版之國外規範進行更新修訂，以因應氣候變遷之挑戰。
2. 討論草案參考引用之國內外規範更新版本，有關需付費才能取得之新版規範是否需進行採購。

(四)鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 目前蒐集之邊坡結合 AI 應用案例及文獻，仍是以較常見之情境，例如：邊坡滑動風險評估及災害預測、劣化辨識及結構弱面分析等，建議蒐集生成式 AI 於邊坡之應用案例，以拓展思路。
2. 建議國外鐵公路邊坡分級制度可考量納入蒐整，相互比較。

(五)114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 討論關聯性研究於校正迴歸模式時之主要考量因素。
2. 討論關聯性模式與前期模式差異，以及未來精進模式之方向。

(六)港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

1. 討論其他設施巡檢劣化項目之探討。
2. 討論新興科技應用於其他設施之巡檢作業。

(七)港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

1. 討論花蓮港及安平港不同地震情境下液化潛勢分析。
2. 討論後續報告內容之加強與補充。

(八)氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

1. 納入溫度修正氯離子擴散係數造成提前發生初始腐蝕。
2. 各縣市使用年限損失差異不大，可能是因為需考量鹽害影響之各縣市年均溫相差不大。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

- (一)請檢視高公局大甲工務段應用本工法之時間，以及更新引用水利署之斷面流速及水位資料。
- (二)後續以水利署演算之大甲溪不同重現期流量進行分析模擬，評估本工法之耐洪性。

二、橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

- (一)建議規劃至不同型式之箱梁進行現地觀摩，以較全面了解國內箱梁內部型態及狀況。
- (二)依據箱內空間及相關構件佈設，檢測輔助工具選擇除固定軌道式、攀爬及自走式機器人外，複雜之箱內空間可研發穿戴式設備方案，輔助人員紀錄以減少檢測人員待於箱內時間。

三、港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

- (一)需要付費購買才能取得之新版國內外規範，建議後續以草案參考引用較多或較常用之新版規範優先採購。
- (二)經初步盤點結果，因應氣候變遷、船舶大型化、耐震規定及材料規格等因素，本草案所參考引用之國內外規範或標準，均已大幅更新，爰刻正辦理函文請交通部辦理退回草案相關事宜。俟退回後，本所將重新進行編修及初審相關作業，完成更新後再陳送交通部辦理複審。

四、鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

- (一)針對所盤點之鐵公路邊坡分級制度和現況，後續如何結合 AI 應用，應在報告後面章節詳加描述兩者之間的關聯性。
- (二)本案所提出適合 AI 輔助鐵公路邊坡之應用情境，後續可歸納及分類，提供其他實務單位參考應用。

五、114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

後續進行關聯性研究，可嘗試應用 AI 技術，分析金屬腐蝕速率與腐蝕因子間之關聯性。

六、港灣構造物巡查檢測作業精進(4/4)-新興科技應用於其他設施巡查檢測作業

- (一)建議補充新興科技 UAV 應用於其他設施巡檢案例之說明。
- (二)建議加強新興科技應用於其他設施之運用與維護管理巡檢作業之精進說明。

七、港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

- (一)下次工作會議請補充液化風險評估之機率分析與定值分析之差異處。
- (二)本計畫前期成果臺北、臺中、高雄等 3 港區之鑽探熱點圖及土壤液化潛勢圖，提供港灣設施維護管理系統介接，相關使用權限設定要慎重，以免影響航商選擇該港埠之停靠意願。

八、氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

- (一)建議再搜尋文獻是否有其他影響氯離子擴散係數之因子。
- (二)後續腐蝕防治策略應朝實務應用提供建議。
- (三)建議詳細列出各氣候變遷模擬情境之使用年限損失。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

貳、時間：114 年 8 月 28 日(星期四) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研員 副研員 副研員 " " " 副研員 助理研員	賴俊基 鄭登建 胡怡了 曹文偉 謝錦屏 黃亨謙 張道光 顏麗香 黃煥長 王浩禮
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李怡娟
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

會議結束直用餐時間。 賴瑞應

附錄五

第 3 次工作會議紀要

114 年 10 月工作會議紀要

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

時間：114 年 10 月 27 日(星期一)上午 9 時至 12 時 50 分

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

1. 本工法施工說明書撰擬說明。
2. 數值分析流程及三維數值分析模型 Q5、Q10、Q20、Q50、Q100 模擬評估情形說明。
3. 階段性成果應用及技術推廣規劃說明。

(二)橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

1. 鋼箱梁內部檢測作業現地觀摩內容說明。
2. 橋梁箱內檢測輔助工具可行方案及橋檢工具開發評估說明。

(三)港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

1. 宇泰工程顧問有限公司視訊訪談盤點及後續編修方向討論。
2. 撰寫期末報告初稿。

(四)鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 鐵公路邊坡分級制度綜整說明。
2. 邊坡分級制度結合 AI 之應用場景剖析。

(五)114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

1. 完成第 1~3 季大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗工作，持續辦理第 4 季工作。
 2. 完成第 4 次水下試片取樣工作，持續辦理水下腐蝕試驗之金屬試片腐蝕生成物清除、秤重工作。
 3. 規劃辦理板狀標準試片之大氣腐蝕暴露試驗。
- (六) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進
1. 完成花蓮港及安平港不同地震情境下液化潛勢分析。
 2. 完成花蓮港及安平港不同地震情境下地震沉陷潛勢分布。
- (七) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響
1. 臨界氯離子濃度、氯離子擴散係數計算公式修正。
 2. 設計年限內鋼筋腐蝕量計算。
 3. 氯離子擴散係數縮減率計算。
 4. 抗氯鹽腐蝕策略分析及彙整。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

- (一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣
1. 三維數值模擬時間及其與二維分析結果轉為邊界條件之討論。
 2. 本工法於不同重現下保護成效及保護工法鋪設方法再改良之討論。
- (二) 橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估
1. 依橋梁箱內環境討論檢測輔助工具可行方案。
 2. 箱梁內部環境需求急迫性討論研發可能性及優先順序。
- (三) 港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點
1. 討論宇泰工程顧問有限公司建議基準後續編修的方式。
 2. 依據盤點檢討之初步成果，討論後續編修方式及初審工作。
- (四) 鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

1. 建議多加蒐集並整理我國邊坡養護單位已實際應用 AI 輔助於邊坡之案例，以提供其他單位參考發展。
 2. 建議針對巡查、監測及地錨檢測等各邊坡管理手段，探討可能結合 AI 輔助應用之應用場景，並說明適用性。
- (五) 114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究
1. 討論進行板狀試片暴露試驗的作業困難與因應方案。
 2. 討論進行板狀試片暴露試驗的後續執行工作內容。
- (六) 港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進
1. 花蓮港及安平港不同地震情境下地震沉陷潛勢討論。
 2. 後續報告內容的加強與補充討論。
- (七) 氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響
1. 臨界氯離子濃度計算公式的適用條件。
 2. 既有混凝土橋梁抗腐蝕策略。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(4/4)-保護成效評估及技術推廣

- (一) 本年度僅於年初進行一次現場拍攝作業，請儘速規劃第二次現場觀測作業，做為成效評估之依據。
- (二) 本計畫為第 4 年期之研究，後續請儘速規劃本工法成效總評估之說明暨技術推廣活動，以供相關橋管機關參用。

二、橋梁箱內檢測技術探討與後續研發評估

- (一) 建議蒐集現行橋梁箱內檢測之檢測作業執行成本，以利比較研發相關輔助工具之成本效益。
- (二) 橋檢人員穿戴式輔助工具可納入勞安有關議題之相關探討，提升本工具之需求及必要性。

三、港灣構造物設計基準(草案)修訂之盤點

臺灣世曦工程顧問股份有限公司及宇泰工程顧問有限公司

司之意見可提供辦理編修及初審作業之參考，以完備基準的內容、調整編修的方式等，俾利於基準更具實用性。

四、鐵公路邊坡分級制度結合 AI 類神經網路模型之應用探討

- (一)邊坡養護單位完成之巡查工作紀錄、各項表單及蒐集大量災害及損傷影像，皆保存於其建置之邊坡全生命週期管理系統或資料庫，而目前 AI 發展日新月異，大語言模型如 ChatGPT 已蓬勃發展，使用者透過一問一答方式即能請 AI 協助判識影像、撰寫程式碼並建構專屬之 AI 模型等等，相較過往，專業門檻已降低不少，使用者僅需著重於資料之蒐集、品管、標註和處理等工作。本研究之目的應定位在盤點邊坡養護單位可供 AI 訓練之資料，協助其發想自身之 AI 應用。
- (二)建議統整各邊坡養護單位之維護管理機制中，共通性之工作、項目及流程，並提供具泛用性之 AI 輔助應用場景。

五、114 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與銅金屬關聯性研究

- (一)後續安裝大氣腐蝕暴露試驗之板狀試架時，建請按 CNS 規範進行安裝。
- (二)試驗裝置多安裝在樓頂，易受颱風、狂風影響，建議於試架側邊增加螺栓鎖緊、底部增加水泥加固，以強化穩定性。

六、港區地震液化風險評估模式精進(4/5)-花蓮港及安平港模式精進

請依據觸發門檻加速度及高潛勢區面積分析成果，推估花蓮港及安平港區之分區地震沉陷量，並說明與花蓮港 0403 地震災況之差異。

七、氣候變遷下臺灣鋼筋混凝土橋梁腐蝕劣化之影響

- (一)應補充耐久性設計評估公式引用依據。
- (二)補充既有混凝土橋梁因應氣候變遷抗腐蝕策略。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 114 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

貳、時間：114 年 10 月 27 日(星期一) 上午 9 時

參、地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研員 副研究員 助理研究員 副研究員 副研究員 副研究員	謝怡了 謝少偉 黃煥良 鄭登輝 黃宇謙 賴俊呈 曾文傑
本所運輸技術研究中心第二科	科長	李信穎
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

附錄六

期末報告審查意見處理情形表

期末報告審查意見處理情形表

項次	委員意見	處理情形
黃俊豪委員		
1	本案之研究方向符合科技發展及實務需求，報告書相關內容完整豐富，值得肯定	感謝委員肯定。
2	AI 技術正快速發展，相關應用只有想不到，沒有做不到，為拋磚引玉，建議研究單位未來可持續蒐集探索其於鐵、公路設施之應用，並適時提供相關單位發想運用。	感謝委員建議，本計畫列舉邊坡共通性之工作、項目及流程，結合 AI 之案例及情境，並提出較具泛用性之 AI 輔助應用場景，可提供鐵公路邊坡維管單位參採。然因 AI 訓練屬資料蒐集和處理階段最為重要，資料品質直接影響最終成果，惟目前邊坡相關資料皆儲存於鐵公路邊坡轄管單位所建置之系統或資料庫中，爰於報告第 5-6 頁建議相關單位可盤點手頭上之數位化資料並進行梳理，後續針對自身需求、邊坡現況及所處場域交通狀況、資料來源和數量等，發想自身 AI 運用。
3	導入 AI 如能明顯提升設施維護管理之品質或效率，則各維護管理單位之採用意願將可大幅提升，建議後續研究可蒐整說明其於品質或效率方面之提升情形。	感謝委員建議，推行新興技術應用對應用單位和相關人員之成效和影響評估的確為重要關鍵，若本所未來有相關導入 AI 應用技術之實際研發，將會針對品質或效率方面之提升情形進行更深入探討，俾後續推行至應用單位時順遂並提升可靠度。
4	如能藉由 AI 檢視巡查影片並辨識出關鍵劣化，將可大幅提升巡檢效率，該類應用建議未來可持續關注。	感謝委員建議，已於報告第 4-2 頁說明 AI 影像辨識於劣化程度辨識之應用場景，相關應用本所未來亦將持續關注。

5	各單位對關鍵設施常實施監測並產出大量數據，爰數據 AI 亦為可優先切入之課題，建議可適時洽相關單位擇代表性案例進行深入研究。	感謝委員建議，已於報告第 4-7 頁說明 AI 協處研判單一來源數據之穩定性、相關性、突變性及正確性，識別並標記異常或不合理之單點數據，確保後續使用之數據品質，以及根據過去一段時間之監測數據，結合 AI 掌握監測場域未來某時刻之變化以及趨勢等應用場景，相關應用本所未來亦將持續關注。
朱我帆委員		
1	本報告完整蒐集鐵、公路邊坡管理及分級制度。	感謝委員肯定。
2	利用 AI 應用於邊坡管理及監測，勢必為未來趨勢，建議結合無人機之高解析度影像及點雲模型，運用多時期套疊變異分析，增加邊坡管理之效能。	感謝委員建議，已於報告第 4-6 頁說明公路局利用邊坡正射影像進行崩塌範圍圈繪，以及應用點雲模型和 DSM 進行災害範圍量測及量體估計等科技巡檢案例，供各單位借鑑，並已提出 AI 深度學習之應用場景，例如：判別受災和未受災區域，使後續災損量體估計更加精確，以便預測清運量、研擬改善或加固方案等。
3	邊坡穩定度受多重因素影響，建議可導入 AI 時間序列深度學習模型，優化使用性。日後建議可整合雨量、水位、位移量等監測數據，提供 AI 預警功能。	感謝委員建議，已於報告第 4-7 頁說明 AI 深度學習模型可協助進行災害之預測，根據過去一段時間之監測數據，結合 AI 掌握監測場域未來某時刻之變化以及趨勢(例如：位移、傾斜角、孔隙水壓或應變量等)，做為初步確認邊坡安全性、後續預警及應變處置和支援決策之參考。

4	承上，建議再利用 AI 強大數據分析及學習能力，進行多變數同步異常偵測，減少誤報率並提高可信度。	感謝委員建議，已於報告第 4-10 頁說明 AI 深度學習模型優勢在於可藉由輸入多變數進行時序預測，並待其同步達到異常閾值時(例如：高降雨量、高地下水位、快速位移同時發生)才發出警報，輔助提升管理值之可靠度，並降低誤報率，以提供更全面之災防應變決策參考。
5	建議可導入 AI 電腦視覺深度學習模型，輔助辨識邊坡設施之劣化程度及裂縫、滑動等情形，使邊坡分級更加客觀量化。	感謝委員建議，已於報告第 4-1 頁整理各單位執行邊坡巡查之項目，以及須留意之劣化跡象，並說明目前保存於邊坡全生命週期管理系統或資料庫之巡查工作紀錄、各項表單及蒐集大量災害及損傷影像，皆係可提供 AI 電腦視覺影像辨識技術學習之素材，應用場景如：項目判別及分類、異狀判識及分類、劣化標記及範圍量化和嚴重程度輔助分級。
6	本公司(國營臺灣鐵路股份有限公司)因應傳統鐵路沿線地形多變(尤以宜花東路段居多)，近年來偶發生因地震、豪雨導致之邊坡土石滑落影響行車之事故。爰此，本公司完成 26 處 AI 影像辨識系統，利用 AI 判別 25 公分粒徑以下侵入路線之落石，發現後即通報相關行安關鍵人員，並循訂定之 SOP 做適當處置，以維安全。此系統相關資料已提供參考，建議可納入本計畫科技應用案例。	感謝委員提供寶貴資料，已納入報告第 4-12~4-13 頁，做為 AI 邊坡穩定分析及安全評估應用相關案例。
王景平委員		
1	報告統整鐵公路邊坡維護管理制度，並訪談實務單位執行作為，整理完整可供各機關參採	感謝委員肯定。

2	第二章文獻回顧蒐集多樣豐富之 AI 應用方法，包括：邊坡滑動風險評估、邊坡滑移監測預警、地形特徵及影像辨識等流程及工具等，建議做節次區分，以利讀者閱讀。	感謝委員建議，已依文獻蒐集結果進行分節：第 2.1 節「邊坡滑動風險評估及災害預測」(報告第 2-1 頁)，以及第 2.2 節「邊坡劣化辨識及結構弱面分析」(報告第 2-8 頁)。
3	第四章 AI 應用，含括「邊坡維護管理與評估分級」之應用，另有關「邊坡穩定及行車安全告警及預警」部分，建議彙整於獨立節次。	感謝委員建議，已於第四章 4.4 節邊坡穩定分析及安全評估，進行邊坡穩定及行車安全告警及預警相關結合 AI 之內容說明
4	對於 AI 應用多涉及各機關災害影像、監測資料等機敏資訊處理，建議後續可提供部分資安作業之要求及指引，供從業人員規劃專案時依循。	感謝委員建議，已於報告第 5-6 頁針對邊坡涉及之機敏資訊之相關處置建議進行初步說明，包含進行資料敏感度分級、提高資安意識、僅在內部網路傳輸、若須使用外部資源則考量加密等。建議未來相關單位於應用 AI 時，再依實際使用之資料所涉機敏程度做相應之資安考量。
5	有關高鐵公司的訪談資料，部分資訊修訂，再請納入修正。	配合委員建議修訂附錄一、專家學者及實務單位諮詢紀錄。
賴瑞應科長		
1	報告完整地蒐集並探討了我國鐵路(臺鐵、高鐵、阿里山林鐵)和公路(公路局、高速公路局)邊坡維護管理機制與現行的分級制度(A、B、C、D 等級，以及公路局的 RHRS 定量分級)。這為後續 AI 模型的設計提供了必要的制度背景和數據來源基礎，予以肯定。	感謝委員肯定。
2	建議建立一個通用且泛用性高的 AI 輔助應用場景清單，幫助各管理單位(如臺鐵公司、阿里山林鐵)盤點自身可供 AI 訓練的數位化資料(如歷史災害影像、表單紀錄、監測數據)，逐步進行智慧化加值應用。	感謝委員建議，已於報告第 5-5 頁將現階段鐵公路邊坡結合 AI 深度學習輔助應用場景及主要優勢綜整後製圖，俾相關單位能一目瞭然。

3	建議將 AI 應用擴展至行政管理，可利用大語言模型(LLM，如 GPT)，結合既有的邊坡維護管理系統或資料庫，輔助文件彙整、自動填報紀錄檢查與校正，使專業人員能將精力集中在專業判讀和現場防災應變上。	感謝委員建議，目前許多公家機關(構)已運用大語言模型，協助致詞稿、新聞稿撰擬等行政工作，以減少文書作業，對比於外業工作較為複雜之環境，此舉是 AI 可行且較低成本可切入之應用課題。若能結合已建置之邊坡維管系統或資料庫，做為 AI 學習素材，並應用其來減少邊坡內業之文書作業及行政流程、統一資料格式和除錯，相信可大幅提升效率，並強化專業人員培訓工作。
李俊穎科長		
1	計畫已完成資料彙整及 AI 應用探討，成果具參考性，可供相關單位應用。	感謝委員肯定。
2	AI 影像辨識在未來應用將累積龐大數量，建議未來可再考量如何整合於資料庫內，加強加值時、空間應用。	感謝委員建議，已於報告第 5-6 頁建議相關單位可盤點手頭上之數位化資料並進行梳理，後續針對自身需求、邊坡現況及所處場域交通狀況、資料來源和數量等，逐步進行智慧化加值應用。
蔡世璿副研究員		
1	有關本報告結論與建議，提到佈署 AI 或使用外部資源介接時需提升資料外洩風險之認知，在軟硬體佈署及應用上，資安這部分的確是重要但容易被忽視的課題，對於本報告有提出此注意事項，予以肯定。	感謝委員肯定。

2	<p>報告中提到，為了應對即時偵測需求(如林鐵落石影像辨識或公路局微地動監測)以及考慮資安問題，可採用在現場監測設備進行邊緣運算的部署策略。然而，鐵公路邊坡，特別是偏遠山區，其面臨的實際挑戰，包括：硬體計算能力限制、電源供應不穩定、無線傳輸頻寬不足、模型輕量化要求，以及如何在惡劣氣候下保證系統的運行穩定性等等，都是實務上不可忽視的課題，建議可以在報告中補充相關內容，以利應用單位多方思量。</p>	<p>感謝委員建議，有關鐵公路邊坡結合 AI，特別是偏遠山區，其面臨之軟硬體實際挑戰及相關建議，已補述於報告第 5-6~5-7 頁。</p>
3	<p>目錄在 3.2 底下列「3.2.1 公路局」後，下一節寫為「3.1.2 高公局」，請修正。</p>	<p>目錄誤繕已修正。</p>

附錄七

期末報告簡報資料



鐵公路邊坡分級制度結合AI類神經 網路模型之應用探討

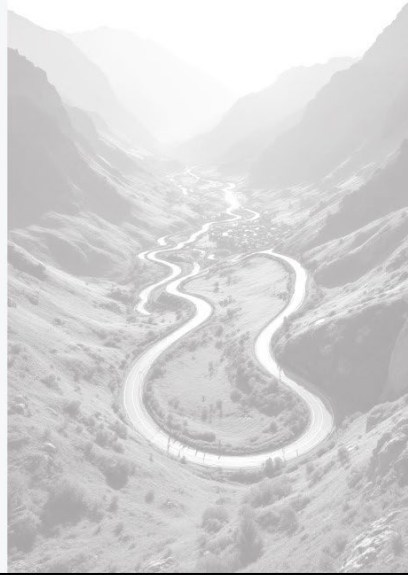
114年度第一科自辦研究計畫期末報告審查會議

報告人 黃宇謙 副研究員

簡報大綱

- 01 前言
- 02 文獻回顧
- 03 邊坡維護管理機制與分級制度探討
- 04 結合AI應用說明
- 05 結論與建議

前言



研究緣起與目的

01

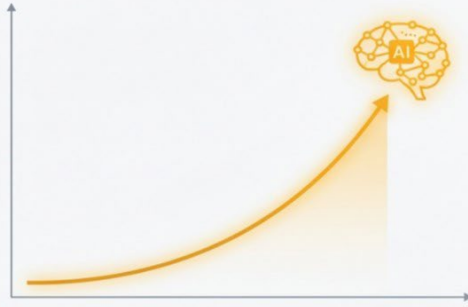
現況與挑戰



- 臺灣屬多山地形，鐵公路運輸系統不可避免需處理邊坡課題
- 颱風、地震、豪雨等天災威脅，加上極端氣候使情況更險峻
- 邊坡維護管理內外業工作，需耗費大量人力進行
- 災害判斷多主觀並倚重經驗累積，人材培育不易
- 作業過程產製之大量資料，未來如何加值應用

.....

契機



- 上位政策揭櫫提出應用創新科技解決運輸系統課題
- 近年AI技術飛躍發展，各項任務場景應用百花齊放，例如：影像辨識、目標偵測及分類、圖資生成及量體分析等
- 邊坡維管單位已蒐集大量資料及相關數位圖資，為結合AI應用立下良好基礎

研究緣起與目的

目的

- ✓ 持續針對邊坡轄管相關單位之維護管理方法、災防機制及新興科技應用等，進行資料蒐集、專家學者諮詢和實務人員訪談工作，並瞭解鐵公路邊坡之分級制度為維護管理之關鍵。
- ✓ 今(114)年探討鐵公路邊坡巡查、檢測及監測，最後進行風險分級之過程，是否有AI切入應用之可行性，使AI能切合現行鐵公路邊坡維護管理機制與防災流程，並達成本所支援各運輸系統技術與研發創新之目標。

工作項目

- ✓ 蒐集國內外AI於邊坡之相關研究文獻

各式AI模型於邊坡現況調查、檢監測、維護管理及災防應用之相關案例

- ✓ 專家學者諮詢及實務單位訪談

瞭解對於AI支援邊坡分級制度和相關維護管理與防災流程專業見解

- ✓ 鐵公路邊坡分級制度探討及資料蒐集

探討鐵公路邊坡分級制度探討及操作流程，並評估過程所產出之資料

- ✓ 分級制度結合AI類神經網路模型之應用探討

研析結合AI模型輔助應用之情境、限制條件及適用性，提出實務應用建議



文獻回顧

04

- ✓ 邊坡滑動分析方法主要分為**知識驅動(knowledge-driven)**及**數據驅動(data-driven)**，前者係基於專家**經驗主觀判斷**，而後者係基於**統計分析及AI**，由大規模**數據資料**中，**歸納**並揭示滑動發生時之**潛在模式及關聯特徵**。

—Xin Dai等4人(2025)

- ✓ 原始資料(raw data)：

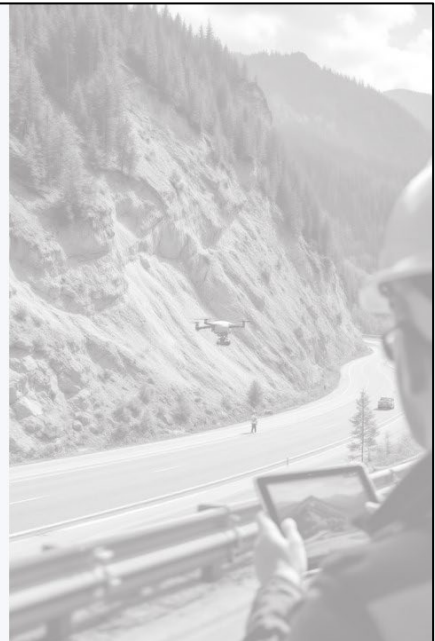
1. 邊坡基本資訊：坡度、坡向、植生生長狀況、岩性、節理面...。例如：土石流好發於坡度約在15~30度間(鄭錦桐等4人, 2012)、易產生落石的岩層必然具有不良地質材料及地質構造(吳淵洵、周南山, 2006)等等
—Xin Dai等4人(2025)、Lorenzo Nava等11人(2023)
2. 邊坡歷史災害
—Xu & Zhang(2025)
3. 邊坡影像、數值模型(DEM、點雲) —Tommaso Beni等9人(2023)、Shuhong Wong等4人(2020)
4. 監測數據
—Yang Xiao等5人(2023)

文獻回顧

✓ 應用情境：



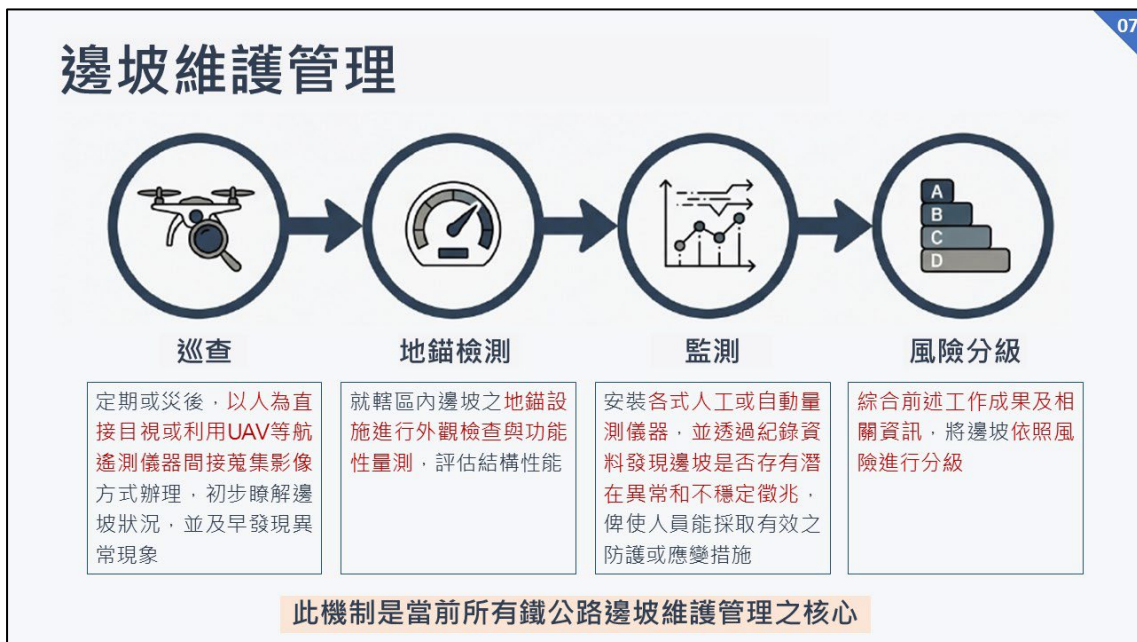
邊坡維護管理機制與分級 制度探討



法源依據



邊坡維護管理



邊坡巡查

✓ 巡查項目

- 1. 邊坡本體**：浮石、坍塌、裂縫、鼓起、沖刷、滲水，以及樹木有無傾倒等情形
- 2. 排水設施**：排水溝(井)之斷裂、變形、破損、堵塞、淤積、外側或底部沖刷及淘空，以及外觀混凝土有無剝落、鋼筋裸露鏽蝕等情形
- 3. 坡體(面)保護設施**：外觀位移、變形、龜裂、突出和凹陷、破損外露，以及有無材料劣化、淘空和異常滲水等情形
- 4. 其他**：監測設備外觀損傷、非法耕作和佔用及有無廢棄物堆積等情形



邊坡巡查項目缺失態樣

資料來源：<https://www.freeway.gov.tw/Print.aspx?cnid=91>

邊坡地錨檢測

✓ 檢測項目

- 1. 錨頭保護蓋外觀檢視**：保護蓋掉落、外觀凹陷、白華、銹蝕、防銹脂洩漏等情形
- 2. 錨頭組件檢視**：夾片脫落、鋼腱內縮或斷裂、表面銹蝕及滲水等情形
- 3. 地錨揚起試驗**：既存荷重



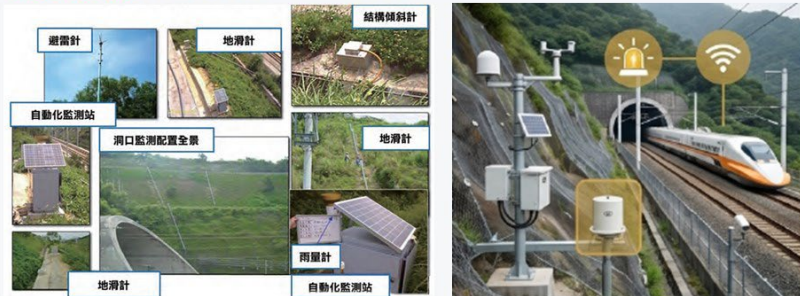
邊坡地錨檢測項目之錨頭保護蓋缺失態樣

資料來源：高速公路養護手冊

邊坡監測

✓ 監測項目

1. **邊坡本體**：測傾管(盤)、沉陷觀測點、裂縫計、地錨荷重計等
2. **氣象/地震**：雨量計、水位計、風速計、地震計等
3. **異物入侵**：欄石光柵、微地動儀等



邊坡自動化監測系統

資料來源：台灣高鐵極端氣候下之天然災變預警機制

邊坡分級

依照車行頻率、軌道線型不良、隧道段等，將A級邊坡再細分為A-1、A-2、A-3

單位	A級(高風險)	B級(中風險)	C級(低風險)	D級(穩定)
臺鐵公司	邊坡有明顯不穩定徵兆且可能影響列車通行	邊坡有疑似不穩定徵兆且可能影響列車通行	邊坡無明顯不穩定徵兆	邊坡處於穩定狀況
高鐵公司	邊坡狀況：輕微不穩定 營運安全：有影響	邊坡狀況：疑似不穩定 營運安全：可能有影響	邊坡狀況：疑似不穩定 營運安全：不造成影響	邊坡狀況：穩定 營運安全：不造成影響
阿里山林鐵	有明顯不穩定或劣化情形且有影響行車之疑慮	疑似不穩定但並無立即影響行車安全之疑慮或無開放通車者	未明顯不穩定且無立即影響行車安全之疑慮	穩定狀況
公路局	災害紀錄：2年內 護坡設施：復(興)建中 不穩定徵兆：明顯	災害紀錄：2年內 護坡設施：無法設置 不穩定徵兆：疑似	災害紀錄：5年內 不穩定徵兆：無	災害紀錄：無 不穩定徵兆：無
高公局	邊坡有明顯不穩定徵兆	邊坡發現有些許疑似不穩定徵兆	邊坡無明顯不穩定徵兆	邊坡處於穩定狀況

針對定性分級為A、B級之不穩定徵兆邊坡，導入落石災害評分系統(RHRS)，進行1~5級定量分類

增列C+級邊坡分級，針對經工程手段復(興)建完成，惟仍具備遠端致災因素導致不穩定跡象之邊坡

科技應用

1. 遙測技術應用巡檢



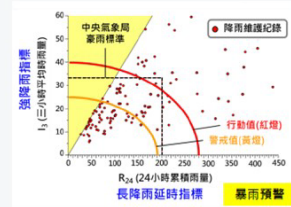
說明：
導入UAV、LiDAR和InSAR等遙測應用，針對易致災邊坡進行災害潛勢調查，蒐集邊坡空拍影像及產製相關數位模型，並於建置數位化圖資檔案。

2. 災害狀況即時告警



說明：
等方式，針對邊坡設置CCTV、攔石柵、感測器落石等異物入侵路線範圍內時，透過無線傳輸至現場告警牌面與手機通訊軟體，通報利害關係人。

3. 警戒和行動模式建立



說明：
運用邊坡歷史災害資料、實時監測數據與氣象預報，透過整合和相關性驗證，反推邊坡潛在之破壞模式，並針對管理值(警戒值、行動值)做探討精進。



結合AI應用說明

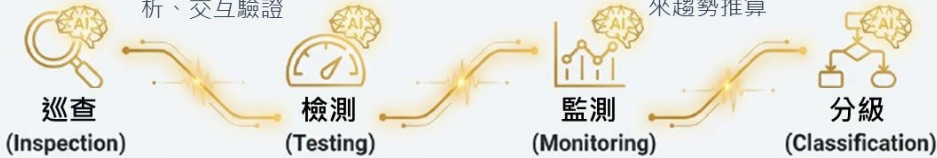
AI賦能

數據分析：

識別並標記異常或不合理之數據(資料品質)、跨儀器與多變數關聯分析、交互驗證

風險預估：

反推或驗證邊坡潛在之破壞模式、災害預測、管理值可靠度提升、未來趨勢推算



視覺辨識：

項目判別及分類、異狀判識及分類、劣化標記及範圍量化和嚴重程度輔助分級

智能秘書：

填報紀錄即時檢查與校正、內容智慧化索引和提取、資料產製和彙整

教育訓練：

教材與題庫生成、自動更新

並非運用AI取代工作，而是做為強大輔助工具，為邊坡維護管理環節注入效能

視覺辨識：客觀、一致、迅速

核心概念：利用AI電腦視覺模型如：YOLO、Mask R-CNN進行圖像分類與物件偵測

1.劣化偵測與判識

資料集交付AI學習和訓練，可協助人員進行劣化程度判識。



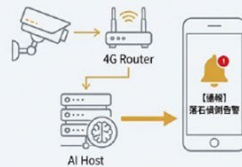
2.災害範圍量測及量體估計

透過AI深度學習，判別受災和未受災區域，使後續災損量體估計更加精確，以便預測清運量、研擬改善或加固方案等。



3.異物入侵告警

應用AI影像辨識技術，全天候且即時偵測邊坡落石與異物入侵情形，若發現異樣將自動觸發告警、發送簡訊或回傳行控中心。



數據分析&風險預估：精準打擊、及早因應

核心概念：利用AI時序模型如：RNN、LSTM分析多來源數據，分析歸納、找出模式

1.數據品管

AI可協處研判單一來源數據之穩定性、相關性、突變性及正確性，識別並標記異常或不合理之單點數據，確保後續使用之數據品質。

2.關聯分析

找出多個監測數據之間是否存在時間上、空間上或因果上之相互關係，實現跨儀器與多變數關聯分析。

3.管理值精進

邊坡穩定性受多重因子影響，AI結合邊坡歷史災害資料、實時監測數據與氣象預報，提升管理值可靠度。

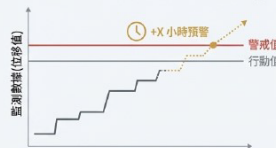
4.風險預測

根據過去一段時間之監測數據，結合AI掌握監測場域未來某時刻之變化以及趨勢做為初步確認邊坡安全性、後續預警及應變處置和支援決策之參考。

傳統方法 (Traditional Approach)



AI 預測方法 (AI-Powered Forecasting)



智能秘書：效率提升

核心概念：利用AI大語言模型如：GPT、Gemini進行智慧對話和生成

1.文書作業輔助

AI可以於人員匯入填報資料時，對內容進行一致性和合理性檢查，或偵測重複性資料和圖像等，並提醒人員校閱。

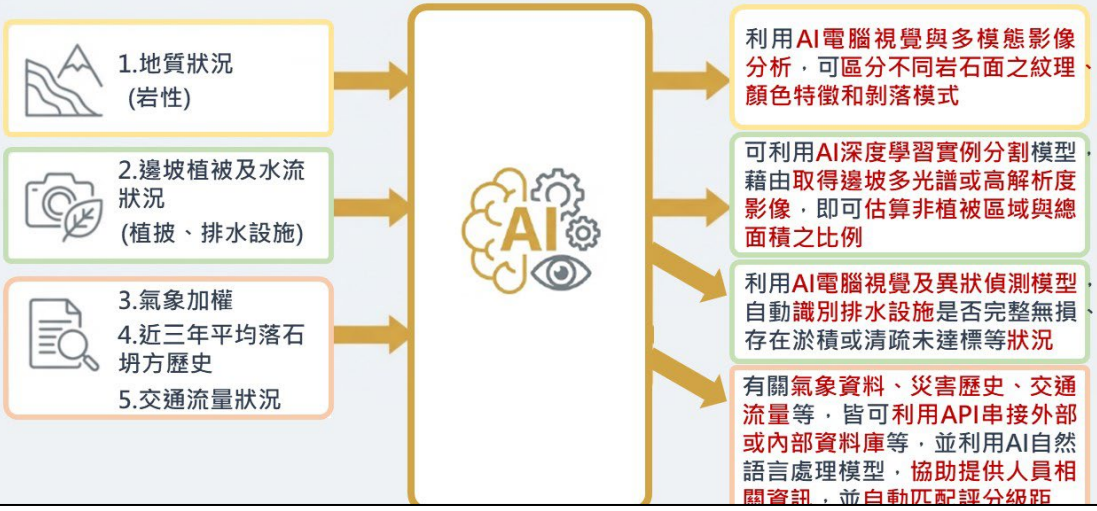
2.資料智慧化索引、彙整和生成

邊坡養護手冊內容龐雜，對於單位新進人員需要不短之時間才能熟悉。故能考量將整個手冊、評分準則、表單紀錄等數位化，人員在現場遇到疑問時，可以即時以行動應用程式向AI提問，並由其立即提供精確之規範引用和解釋，化身智慧助理。

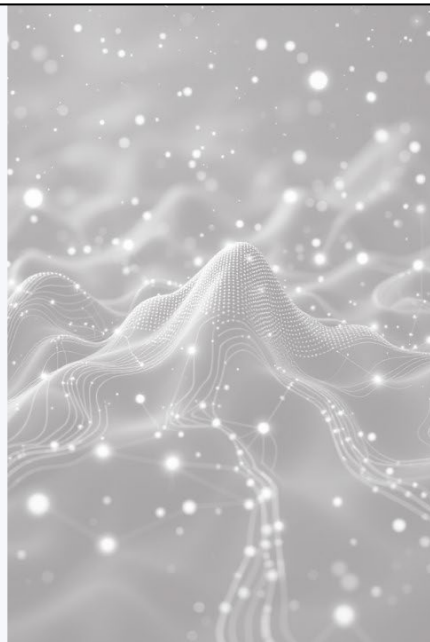
3.人才培育和訓練

教育訓練教材與題庫可應用AI針對最新增修訂規範和手冊內容，自動更新、生成或修訂課程內容，並進行重點彙整，為各類課程如：邊坡巡查、地錨檢測、邊坡安全評估與分級等來生成測試題庫，俾使訓練成效提升

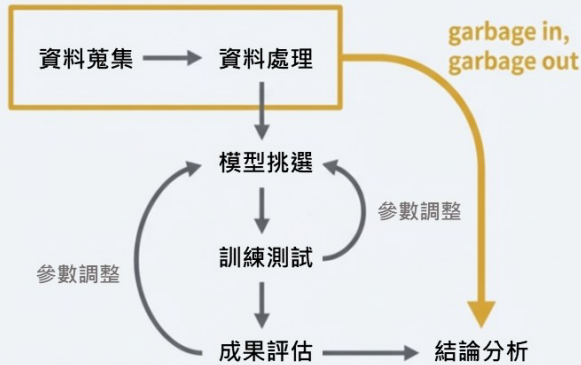
公路局RHRS結合AI輔助應用說明



結論與建議



結論與建議



資料為王

AI自資料蒐集、處理至模型挑選及後續工作之流程中，資料蒐集和處理耗費之時間人力最多，包含資料儲存、清洗、整合、減量、格式轉換、標記等工作。然而，模型結果直接取決於訓練資料之品質、數量與一致性。

優勢所在

目前鐵路邊坡養護單位皆已建置邊坡維管系統或資料庫，為AI導入奠定了資料集基礎和自動化接口。

首要任務

將邊坡維護管理流程中積累之大量寶貴數據進行梳理，以系統化、標準化方式將現有數據轉化為導入AI應用之資產。

結論與建議



本計畫列舉邊坡共通性之工作、項目及流程，結合AI之案例及情境，並提出較具泛用性之AI輔助應用場景，提供鐵路邊坡轄管單位參採，建議相關單位可予以借鏡，發想自身AI運用。



AI日新月異且相較過往專業門檻已降低不少，使用者僅需著重於資料處理工作，建議盤點自身擁有之數位化資料，針對需求、邊坡現況、資料數量等，逐步進行智慧化加值應用。



佈署 AI 或使用外部資源介接時需提升資料外洩風險之認知。可考量模型部署於單位自有機房或私有雲環境中，或在現場監測設備進行邊緣運算，僅回傳分析結果而非原始監測數據。

智慧轉型是一段漫長旅程，並非一蹴可幾，需務實且有規劃逐步導入使用

簡報結束 敬請指教

