

出國報告(出國類別：研究)

鋪面養護管理智慧化與 減碳策略方向

服務機關：交通部高速公路局

姓名職稱：李寧 正工程司

派赴國家/地區：美國/舊金山、沙加緬度、蓋恩斯維爾

出國期間：113年4月1日至113年6月24日

報告日期：113年8月26日

摘要

在美國，公路系統為最重要的陸運設施，本專題研究透過了解美國加州與佛州之高等級公路(高速公路)之管理養護機制，首先探討鋪面績效評估與檢測技術如何與鋪面管理系統有效結合，達到科學化、邏輯化之整修規劃決策，進而研擬適用於我國之鋪面管理作為精進發展方向。此外，並蒐集此兩州之運輸部(Department of Transportation)如何將鋪面工程對於環境之影響納入養護考量，參考不同地區面臨之永續挑戰，擬定適用於我國之永續對策，分別就鋪面工程可行之節能減碳措施，以及氣候變遷韌性調適對策；落實管控國道鋪面之服務能力，在大環境日益嚴峻之挑戰下，提高管理、維護之效率，除使設施穩定保持可接受之狀態外，並減少對環境造成之影響。

目錄

壹、前言.....	1
一、研究目的.....	1
二、計畫與準備.....	3
貳、過程.....	5
一、整體行程概要.....	5
二、研究過程紀要.....	8
(一) 大都會運輸委員會 MTC.....	8
(二) 加州運輸部 Caltrans- 維護組鋪面業務辦公室.....	20
(三) 佛州運輸部 FDOT-州材料辦公室.....	31
(四) 加州大學鋪面研究中心(UCPRC)-Davis.....	50
(五) 其他專家學者訪談及 EDC-7 永續鋪面論壇.....	61
參、心得及建議事項.....	67
一、心得.....	67
(一) 橋面的管理與伸縮縫平整度.....	67
(二) 跨文化交流中的啟示.....	68
(三) 期待更多的技術交流與合作.....	69
二、研究總結.....	70
(一) 國道鋪面管理系統精進.....	70
(二) 鋪面再生材料推廣及永續政策.....	74
(三) 鋪面氣候變遷調適作為.....	77
三、建議事項.....	79
附錄一 參考資料清冊.....	81
附錄二 Caltrans, Sustainable Pavement Ideas Repository.....	82

本文

壹、前言

一、研究目的

國道為車輛南來北往重要運輸管道，除服務城際運輸外，亦須服務都會旅次，實為發展經濟不可或缺的命脈。自民國 67 年國道 1 號全線通車以來，大多數國道路面已經接近甚至已經超過其原先的設計年限，加以近年許多外在環境變化，例如極端暴雨的增加、地震、洪水等天災，如何將各項設施養護維持在良好的狀態，提供安全的行車環境，為當前重要課題。國道鋪面之養護工作為各類設施中所佔經費比例最高者，約佔全部設施經費之 30%~40%，而道路鋪面之完整性與平整性，更直接影響到用路人對於道路設施之滿意度。

設施維護是每年持續不斷的工作，又因為需要兼顧用路人的需求，必須「穿著衣服改衣服」分年維護，每年重覆「計畫、施工、績效檢測、檢討改善」的過程，安排適當的整修計畫，周而復始，並以長期將路面設施維持在整體尚良好之狀態為目標。

當前國道之鋪面巡查與維護作業，均係依循交通部高速公路局之養護手冊，其內涵已經將鋪面之全生命週期考量在內，惟近年來路網愈趨複雜，又同時面臨交通量持續成長、極端氣候更加嚴峻等考驗，已非傳統人工作業所能因應，而需要借重鋪面管理系統及自動化檢測、鋪面成效預測試驗等先進技術，方能有效管理並將資源有效分配。本部高速公路局(以下簡稱高公局)已建置國道鋪面管理系統登載每年績效檢測資料及施工履歷，並有 ETC、動態地磅等交通量數據。若借鏡先進國家作法，搭配完整之歷史資料蒐集，發展相關績效預測模型之建立，將每年經費做最適分配，有效提升鋪面管理經費之運用效率。

此外，節能減碳與提升氣候變遷下之設施韌性均已成為我國當前重要政策目標，亦有必要深入探討刨除料(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)與其他再生材料應用之技術可行性。

本次赴美進行短期研究，主要希望藉由考察美國加利佛尼亞州運輸部(Caltrans，或簡稱加州運輸部)與佛羅里達州運輸部(FDOT，或簡稱佛州運輸部)之高等級公路鋪面管理維護方式，並拜訪此 2 州其他相關鋪面工程相關之研究單位，包含加利佛尼亞州灣區大都會運輸委員會(Metropolitan Transportation Commission，簡稱為 MTC)及加州大學鋪面研究中心(University of California Pavement Research Center，簡稱為 UCPRC)，彙整「鋪面維護管理精進」、「再生材料運用與節能減碳」以及「氣候變遷設施韌性提升」等三大重要核心議題，彙整出適用於我國環境之研究發展路徑及對策，提供我國公路鋪面養護管理之參考。

茲就各核心議題探討與蒐集資料之重點方向，說明如下：

一、鋪面維護管理精進：本議題又再包含鋪面管理系統之設計與應用、鋪面績效檢測技術及分析方法、鋪面生命週期績效預測與決策方法等。

(一)在鋪面管理系統之設計與應用部分，因高等級之公路系統與一般市區道路之養護管理方式因環境條件不同，也必須採用不同之維護管理機制。本研究考察對象包含 Caltrans、FDOT 及 MTC 之鋪面管理機制及其鋪面管理系統。

(二)在鋪面績效檢測技術及分析方法部分，在我國，為因應國道交通量逐年增長，鋪面狀態調查作業人工作業風險高，使用自動化檢測車輔助作業已成為當前趨勢。本研究了解 Caltrans、FDOT 及 MTC 等道路主管機關量化蒐集鋪面服務績效狀況之方法，並參訪相關試驗室，了解本次參訪之 2 州如何測試及評估各種不同鋪面材料與工法之成效。

(三)在鋪面生命週期績效預測與決策方法部分，鋪面績效狀態之變化趨勢為鋪面管理系統中重要決策指標，除定期使用自動化檢測車輔助作業了解鋪面狀態，可再搭配各種成效試驗、加速試驗等設備，預測鋪面生命週期中的績效變化。本研究了解 Caltrans、FDOT 及 MTC 等道路主管機關之決策樹與不同鋪面管理層級之預測模型，以作為我國未來研究發展方向之參考。

二、再生材料運用與節能減碳：當前節能減碳不但已成為我國重要政策

目標，更是全世界共通關注之趨勢。本研究蒐集 Caltrans 及 FDOT 當前面臨之節能減碳挑戰及因應措施，並了解其對於永續鋪面 (Sustainable Pavement) 之相關對策及研究發展方向。

三、鋪面工程之氣候變遷調適措施：全球因氣候變遷之影響，極端暴雨、氣溫變化等頻率與強度均有提高，本研究除了解 Caltrans 及 FDOT，在鋪面工程之設計、維護面向，如何將相關影響納入考量，強化公路鋪面對於外在環境因素變遷之韌性，並訪問聯邦公路總署(簡稱 FHWA)資源中心，了解整體公路設施對於氣候變遷韌性之研究發展方向，將可作為我國未來研訂相關發展方針之參考。

二、計畫與準備

本次研究工作內容並非單純的上課學習或參加會議，預計前往拜訪及考察之單位均為美國政府機關，或是與政府有密切合作之學術研究機構，事前準備與進行相當不易，出國考察人員(以下簡稱：筆者)能夠成行，除感謝交通部提供經費支援外，更要感謝多位國內外專家學者之協助與支援，才能完成所有參訪及聯繫工作。

首先感謝在 Caltrans 擔任與本局聯繫窗口之結構工程師趙青、國立成功大學楊士賢教授、FDOT 材料辦公室鍾閱文博士，分別協助我找到正確的聯繫窗口並最終得以促成交流；感謝台灣輪胎循環經濟協進會邱垂德博士、本局工務組陳順興副組長、北分局呂奇龍工程司、南分局楊熾宗分局長，在相關技術問題上花費許多寶貴時間為我解惑並和筆者於研究過程中進行許多討論，使筆者在研究過程中能夠有更好的吸收。此外特別感謝美國土木工程師協會(American Society of Civil Engineers，簡稱為 ASCE)的王華弘博士，王博士過去在台灣工作多年後移居美國，本次除熱心協助筆者找到這 3 個月期間在舊金山灣區的住宿地點及提供許多生活上的照顧外，更引薦許多在美工作之臺裔土木工程師，並指點許多與不同背景文化之外籍人士交流溝通之要領。

113 年度之短期研究甄選作業，係由交通部於 112 年 7 月 21 日通知各所屬機關推薦候選研究議題，其後於同年 10 月 31 日安排出國人員赴

交通部面談，面談 5 位，因經費有限，將依遴選結果次序核定相關經費。11 月 20 日公布遴選結果，筆者有幸排序為第 3 名，於 113 年 3 月份核定相關經費後，4 月 1 日出發前往美國舊金山。

本次短期研究前往之機構臚列如下：

- 舊金山灣區大都會運輸委員會 Metropolitan Transportation Commission (MTC)
- 加州運輸部 Caltrans (California Department of Transportation)
- 佛州運輸部 FDOT (Florida Department of Transportation)
- 加州大學鋪面研究中心 UCPRC (University California Pavement Research Center): 包含位於 Berkeley 校區及 Davis 校區之研究團隊。



圖 1 筆者與 ASCE 王華弘博士伉儷合影

貳、過程

一、整體行程概要

筆者出國期間共計 85 天，除最後 1 日為返國搭機時間外，共有 12 週時間在美考察學習。表 1 為本次行程概要與停留地點。

表 1 整體行程概要

日期	行程內容	停留地點
4/1~4/7	熟悉環境、安排住宿地點 聯繫及預備後續之參訪活動	加州舊金山
4/8~4/30	大都會運輸委員會(MTC)	加州舊金山
5/1~5/19	加州運輸部(Caltrans) 加州大學鋪面研究中心戴維斯分校 加州大學柏克萊分校	加州沙加緬度 加州舊金山
5/20~6/10	佛羅里達州運輸部材料試驗辦公室 (State Material Office, FDOT) 考察 FHWA 資源中心訪談 參加 FHWA EDC-7 永續鋪面論壇(線上)	佛州蓋恩斯維爾
6/11~6/23	加州運輸部第 4 區工程處考察 文獻資料研讀與彙整 處理返國事宜	加州舊金山

本次共訪問 3 個政府道路主管機關，包含：加州運輸部 Caltrans 和佛州運輸部 FDOT、以及加州灣區大都會運輸委員會(MTC)，以及至 2 間鋪面試驗室進行交流訪問，並連繫不同單位的 4 位專家學者進行訪談。

了解這 3 個政府道路主管機關的相關業務內容和運作方式後，筆者認為 Caltrans 和 FDOT 性質上接近國內高速公路局和公路局的綜合體；而 MTC 的角色則和我國的國土署比較接近。Caltrans 和 FDOT 的轄管範圍都包含市區道路，但兩個機關都表示市區道路是由運輸部和地方政府共同養護管理，大多數情況下運輸部在地方道路維護管養的參與，都是負責提供技術規範以及部分養護經費，實際維護管理由地方政府自行辦

理，屬於輔助的角色。直接由運輸部維護管理的都是較高等級的公路，包含州公路(State Highway)、州際公路(Interstate Highway 及 國道(US Highway)等，其標誌如圖 1，而佛州另有收費高速公路 Turnpike，標誌如圖 2。我國高公局維護的國道等級大致等於 Interstate Highway(州際公路)和佛州的 Turnpike，而 State High Way 則與省道較類似，可能會與地方道路相交。



圖 1 加州各級公路標誌牌(圖片來源：參考資料[1])
(左上:US route,右上:Interstate Highway, 下：State Highway)



圖 2 佛州收費公路 Turnpike 標誌牌 (圖片來源：參考資料[2])

MTC 則是主要輔助灣區 9 個郡(地方政府)維護管理地方道路，提供維護管理之作業原則、鋪面管理系統等維護工具，並定期修訂道路養護作業規範及辦理檢測人員與機具之認證作業，以利於地方政府辦理鋪面服務檢測等專業服務採購時可快速審核廠商是否具備足夠之專業能力。對這些政府部門進行考察時，交流重點主要為其鋪面管理機制(含巡查方式與設備、鋪面管理系統、養護決策方法等)、永續鋪面政策及現況。

本研究在專家訪談部分，依據不同受訪者之專長設定訪談題目。學術單位之受訪專家首先為加州大學柏克萊分校(UC Berkeley)土木工程學系的 Arpad Horvath 教授，訪談重點為營建工程中為了節能減碳必須執行得生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)執行方法與未來研究發展方向。接著是加州大學鋪面研究中心的主持人 John Harvey 教授，訪談重點為研究團隊在鋪面節能減碳方面當前重要研究成果及未來研究發展方向，以及其帶領之研究團隊與 Caltrans、FHWA 等政府部門之間的合作關係。研究第 3 位對加州州立大學溪口分校(California State University, Chico)土木工程學系的 DingXin Cheng 教授進行線上訪談，重點在與 Cheng 教授與 MTC 之間的合作關係、針對廢輪胎橡膠混凝土的運用經驗以及提升鋪面氣候變遷調適韌性之建議等。第 4 位訪談的專家學者是目前任職於 FHWA 資源中心的 Geffery Ger (葛正復)博士。美國與我國的自然環境、交通特性、法規等條件都不相同，當面對各種問題與挑戰時，必須充分思考後再產生適用於我國的對策和研究方針，不能不經思考就直接複製國外做法，因此，對於葛博士的訪談重點為 FHWA 就公路基礎設施之永續政策及氣候變遷調適之核心觀念、如何由核心觀念發展出行動方案，進而帶動各級機關共同提升。

二、研究過程紀要

(一) 大都會運輸委員會 MTC

MTC 為本次筆者進行研究期間第 1 個學習的機構，其組織職掌主要為行政管理、交通規劃、運輸系統預算分配與管理等，不難想像其工作重點大多注重在大眾運輸系統、車輛管理、交通控制等部分。MTC 負責為加州灣區的 9 個郡、共計 107 個市(City)這麼多的地方政府輔助鋪面養護業務，也需要進行許多研究發展工作，例如：修補材料的選擇、公法改良、規範修訂…等等，但地方政府人員流動大，在 MTC 內部也沒有像 DOT 那樣完整的人力配置，鋪面管理的業務僅有 1 位專職人員負責引導，故整個鋪面管理系統的發展、程式撰寫、相關監督、教育訓練及研究發展的工作均以委外辦理為主，包含顧問公司和許多來自不同學術單位的研究團隊共同工作，但外部單位的人員並未在 MTC 內部上班，而是透過密切的線上會議進行聯繫，讓 MTC 的人員可充分了解各研究計畫及鋪面管理系統的運作狀況。雖然 MTC 為政府機關，也只有 1 位公務員專職負責鋪面相關業務，但在道路設施維護管理方面，MTC 有相當大的成就，並將其自行研發的鋪面管理系統推廣至美國其他州，並持續向海外市場拓展。MTC 目前使用的鋪面管理系統名稱為「Street Saver©」，該軟體之開發與產權屬於均屬於 MTC 所有。

MTC 的辦公室位於舊金山市區，距離灣區的捷運系統 BART 車站大約步行 10 分鐘左右的距離。該建築物原本是用於研發製造戰車(坦克車)，大約在 10 年前由 MTC 收購，並將內部以回收木料重新裝潢整理過，整體設計感覺非常溫暖，極有特色。



圖 3 MTC 辦公室外觀



圖 4 MTC 辦公大樓一樓大廳

筆者在 MTC 考察期間主要跟隨 Sui Tan 博士學習，其職稱為 Pavement Management Program Manager，負責帶領 Street Saver[®]的開發營運團隊。團隊中只有他本人是公務員，其他成員均屬於顧問公司(主要為 NCE 的土木工程技術顧問)或學術單位的人員。本次筆者除有幸能夠就近觀摩了解其工作內容外，更得以參與 MTC 主辦的 2024 年度第 1 次調查人員訓練及資格考核(pavement rater and vender exam)，及為期 4 天的鋪面管理系統使用者教育訓練，並能透過旁聽 MTC 鋪面管理部門之工作會議，獲益良多。



圖 5 筆者與 MTC 的 Sui Tan 博士合影

因疫情後工作型態改變，MTC 仍然維持以遠距辦公為主的出勤方式，每周只有 2 日(原則為週二、週三)需進辦公室上班，若需出差或前往工地，也是由住所直接出發。而與 MTC 鋪面管理部門合作的顧問公司和學術單位所在地點很多都相當遙遠，甚至有遠至德州、佛州的團隊，因此工作會議之召開也以線上會議居多。

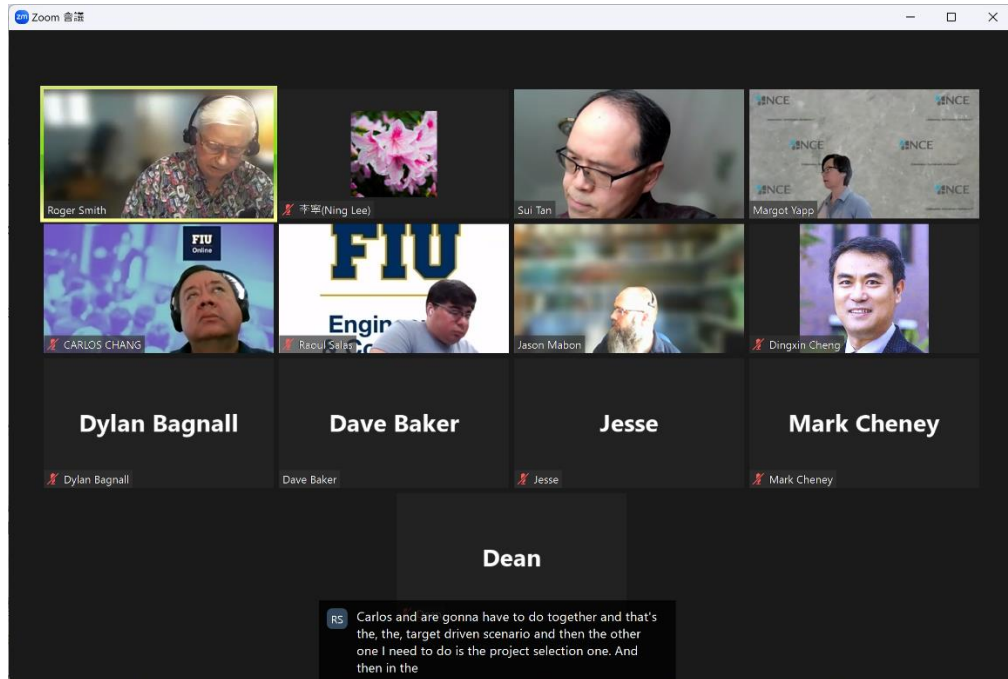


圖 6 MTC 鋪面管理團隊線上會議情形

在 MTC 調查人員的訓練課程中，包含介紹鋪面損壞的種類、如何調查，高公局過去也曾經辦理類似的教育訓練，但差異在於每次受訓的人數縮減，每 1 位講師大約只指導 3~5 位學生，且是直接在道路上上課為主，並不是只用簡報做在室內上課。MTC 也開發了一套鋪面狀況調查用的 APP，參加訓練的人員可以先以人工方式評估，再拍照使用 APP 辨識後做比對，如此就可逐漸培養本身看到道路狀況時的立即判斷，而不需只能依賴 APP。畢竟雖然有 APP 可以用，但人員自身仍須具備足夠的專業能力。



圖 7 Sui Tan 博士在 Oakland 市區內就各種損壞態樣現場說明

在課堂講授部分，除介紹損壞態樣外，也會說明為什麼會重視這些種類、這些種類分別的成因是什麼、處理的優先順序及可能的處理方式。造成鋪面發生損壞的原因有可能是交通量、環境影響、其他因素(設計/材料/施工因素)。要能夠分辨原因，有些是跟整修排程有關，有些則可能是因為發生了特殊的狀況而導致損壞，這就應該立即處理不該放到整修週期才去處理。MTC 使用的鋪面破壞調查方法雖然是引用自 ASTM D6433 的 Pavement Condition Index Survey(參考資料[3])，屬於歷史悠久且已經非常普遍的徒步調查方式，我國國道養護手冊早期也曾採用此種調查方式直到後來交通量過大才無法繼續沿用，但 MTC 經過多年的調整和演進，已經把加州道路主管機關最關注的損壞種類限縮到 8 種，僅針對會影響整修決策的態樣對人員作訓練。

圖 6 是筆者節錄自 MTC 訓練教材之損壞態樣與發生原因對照表。這張表裏面並沒有國內經常關注的坑洞，只有補綻(patch)，這是因為通常在安排整修計畫的時候，坑洞早就都已經補起來變成補綻了！這也是為何高公局於 2023 年 5 月修訂養護手冊時，將定期調查紀錄表中的「坑洞」一項刪除，因為坑洞必須立即處理，其存在不應進入整修決策的考量，若補綻狀態不佳，則表示該位置坑洞的修補不易處理，修好了也很容易

重複再壞。另外，我國國道上常見的的薄層剝離或稱為剝脫，則是屬於嚴重的 raveling 狀態。但因為天候條件和鋪面結構的差異，在加州灣區甚少發生剝脫現象。

Table 1. Severity Levels of Distress Types Related to Cause of Deterioration for Asphalt and Surface Treatment Pavements

Distress Type	Cause of Deterioration		
	Load	Environment	Other
Alligator Cracking	L, M, H		
Block Cracking	H	L, M	
Distortions			L, M, H
Longitudinal and Transverse Cracking	H	L, M	
Patching and Utility Cuts	(L, M, H)/2		(L, M, H)/2
Rutting and Depressions	L, M, H		
Weathering		L, M, H	
Raveling		M, H	

圖 8 節錄自從 MTC 訓練教材之損壞態樣與發生原因對照

MTC 鋪面管理系統的訓練課程內容也非常精彩，不僅如一般的訓練，告訴使用者怎麼操作，在開始操作之前，更是花了非常多的時數讓參與訓練的人員(多為各個郡的鋪面管理系統承辦人)了解鋪面管理的正確觀念及建立鋪面的基本知識，也會向使用者說明今年系統增加了什麼新功能、大家提出的意見他們做了怎樣的處理等等。鋪面管理系統原本就不應該只是指電腦系統的系統，而是指整個管理的方式之組成機制，其運用的目的，可以有兩個不同方向。第一種是將有限的經費做最有效的分配，告訴使用者投入多少經費，最後預期有多少效果。第二種則是從目標反推需要的經費，例如：要將整個路網的平均 PCI 在 3 年內達到 70 以上，需要投入多少經費。財務永續對於運輸基礎設施的營運非常重要。鋪面管理系統的組成可以分成 4 大基本要件，如果都用電腦軟體來處理，會包含：基本資料(Inventory)、鋪面狀況調查(pavement condition survey)、績效曲線(performance curve)和損壞處理方式決策樹(decision tree)。

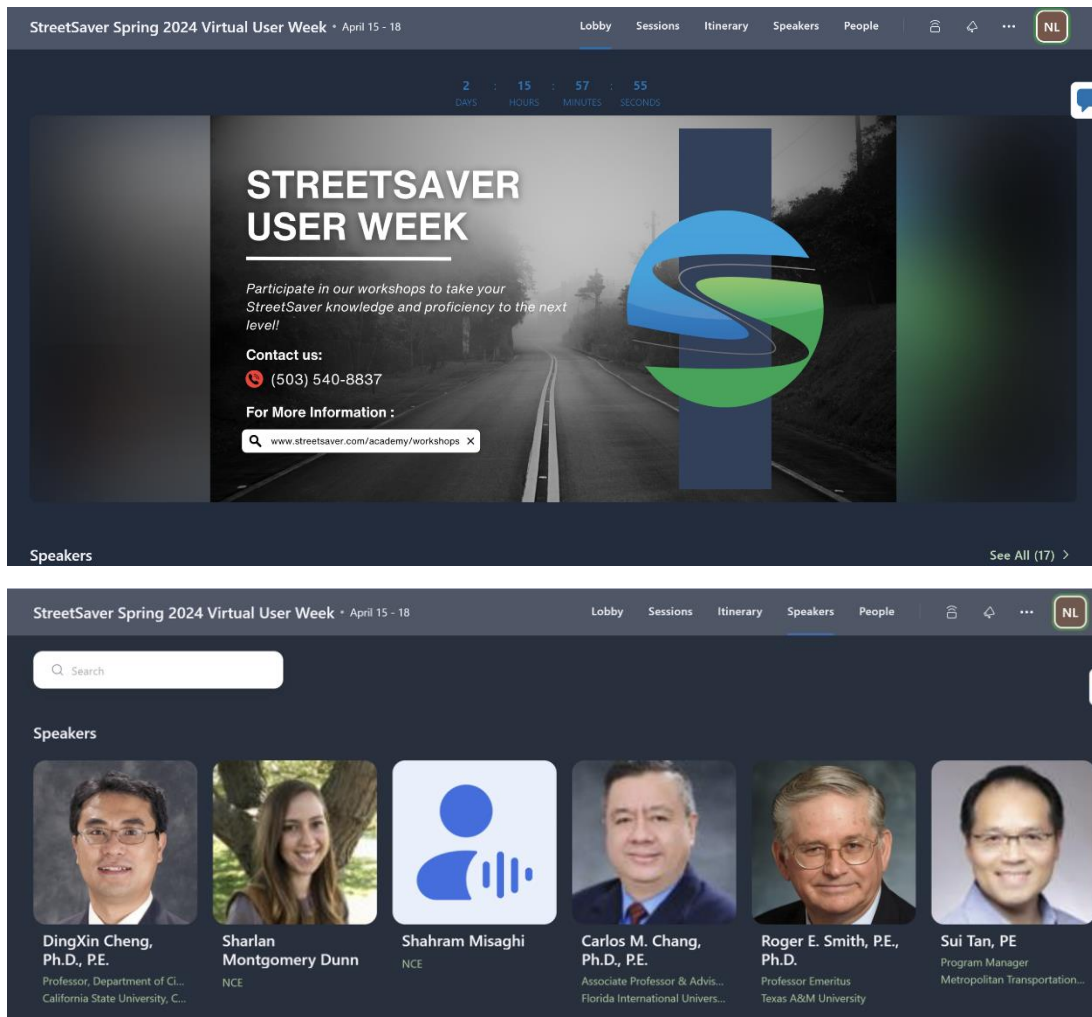


圖 9 MTC 春季鋪面管理系統教育訓練活動

StreetSaver®在全美各地已有許多城市使用，該系統的操作並不複雜，但已經足以從裡面獲取各種報告用來回答長官和民眾可能提出的問題。除了道路主管機關外，也有一些擁有很多停車場跟車道的大型連鎖店也會使用類似這樣的鋪面管理系統。詢問其他使用者的相關經驗，該系統一般來說不需要每天使用，大多數的人可能一年使用 2~4 次而已。也有許多長官有帳號但他們從來不進去看，一個機關通常只需要 1~2 個人比較熟悉就已經足夠了。資料平常會做更新，但是維修紀錄每一年只需要分為 1~4 次上傳更新即可。

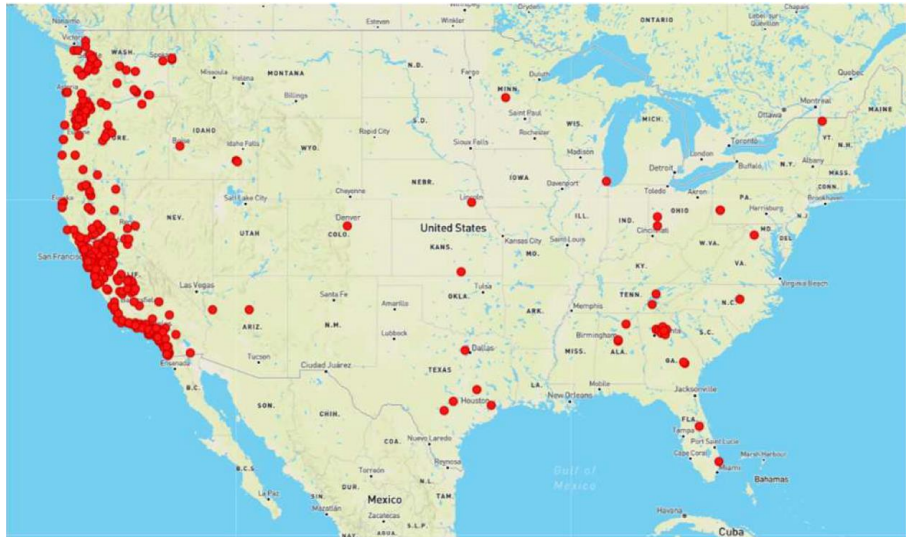


圖 10 全美已經使用 StreetSaver[®]的城市分布(資料來源：參考資料[4])

運用鋪面管理最大的優勢在於可以將經費運用的效率透明化，其發展初期的邏輯和整個建構觀念是學術單位先做出來，然後另外找軟體專長的顧問來撰寫。雖然目前已經算是完整成熟，但 MTC 的團隊仍然持續追求精進，增加系統使用的彈性，以便應付各種狀況。例如，StreetSaver[®]內的決策樹可以由使用機關自行決定調整所有的工項名稱、成本、適用條件，更可以由使用機關依照需求，針對不同氣候或重要程度的路段，分別建立專用的決策樹。除市區道路用的版本外，已經有供停車場專用的版本(如果以高公局而言的話，或可符合服務區管理之用)，使系統的運作更具有彈性也能更加符合全美國不同地區的狀況。此外，他們也正在開發將人行道、排水系統、道路標線…等其他各種設施全數納入，以便讓地方政府負責工務的同仁可以整合管理多種設施。

Example Maintenance Strategy

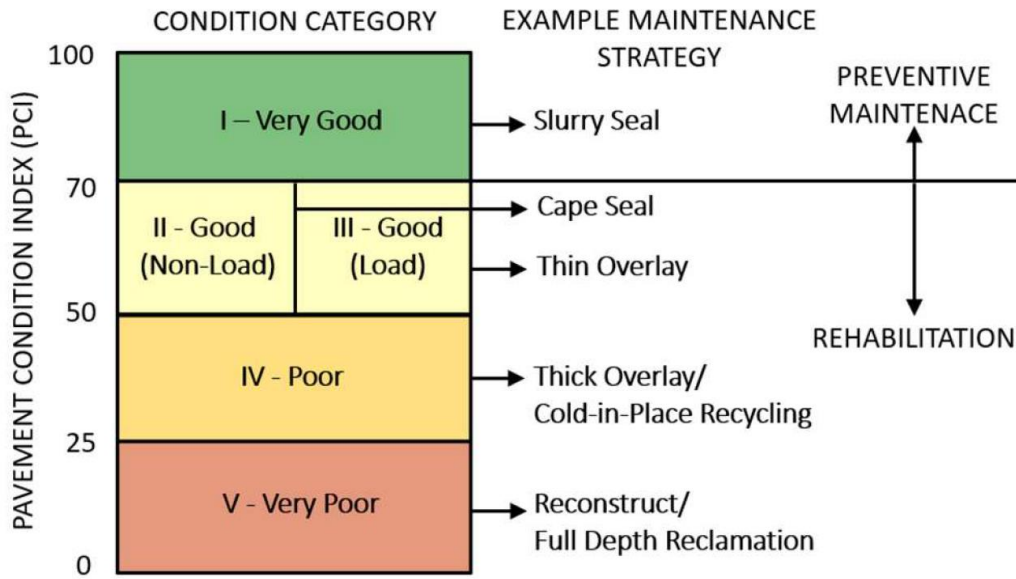


圖 11 MTC 定義 PCI 分數和不同處置方式之間的關聯

(資料來源：參考資料[4])

Example Decision Tree

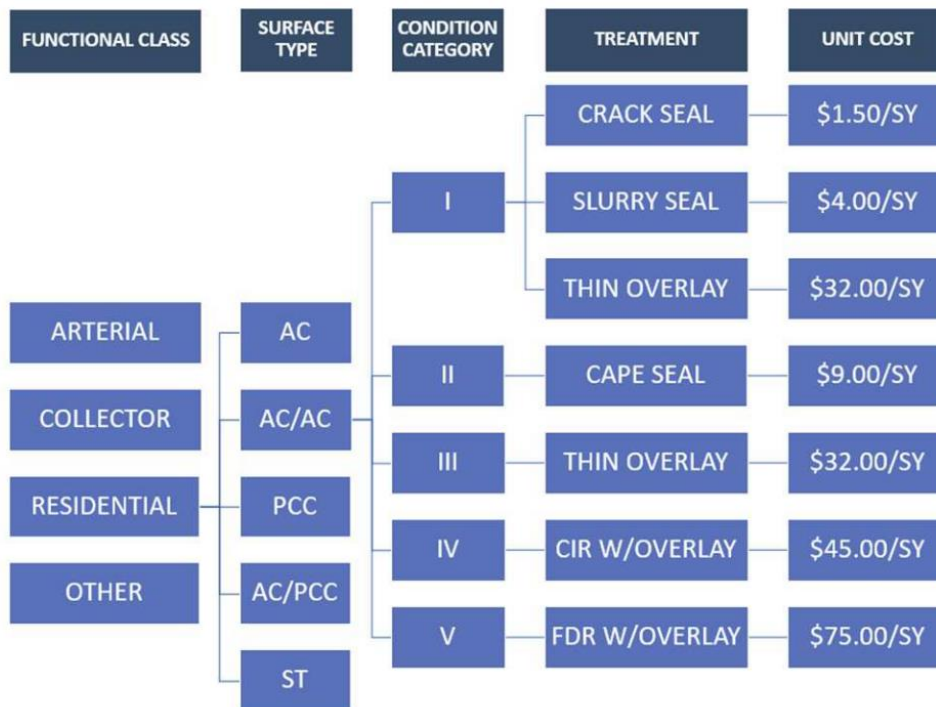


圖 12 StreetSaver®內的決策樹範例 (資料來源：參考資料[4])

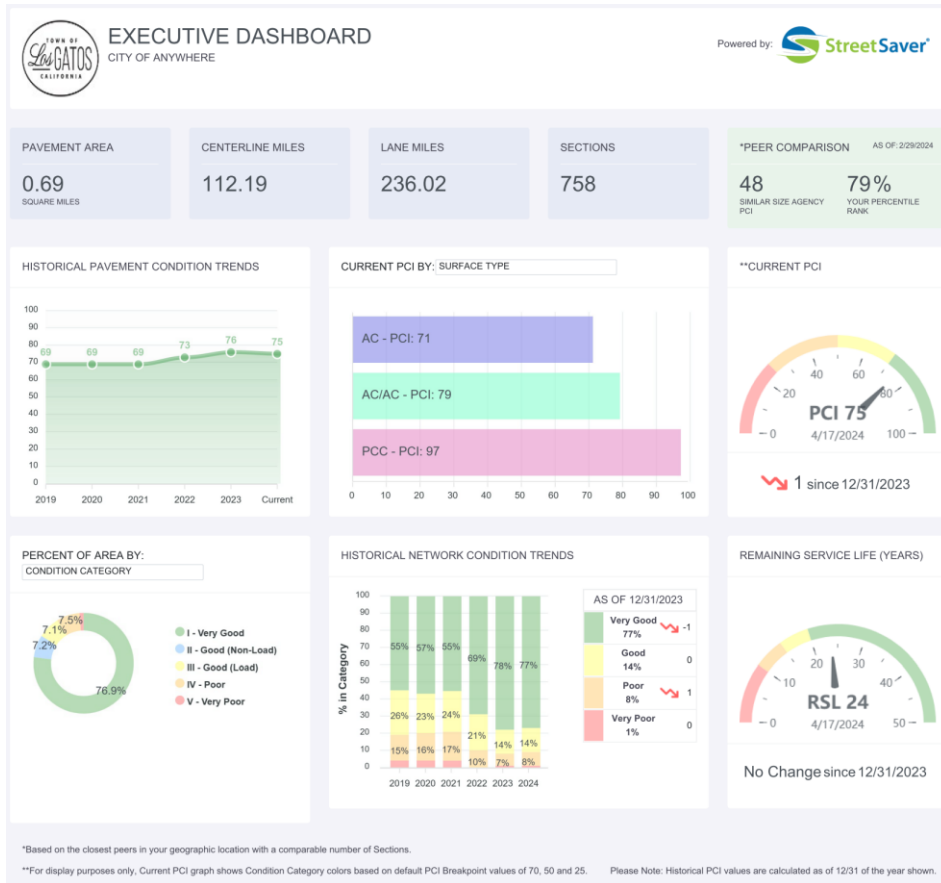


圖 13 MTC 的鋪面管理系統 StreetSaver®畫面截圖(1)

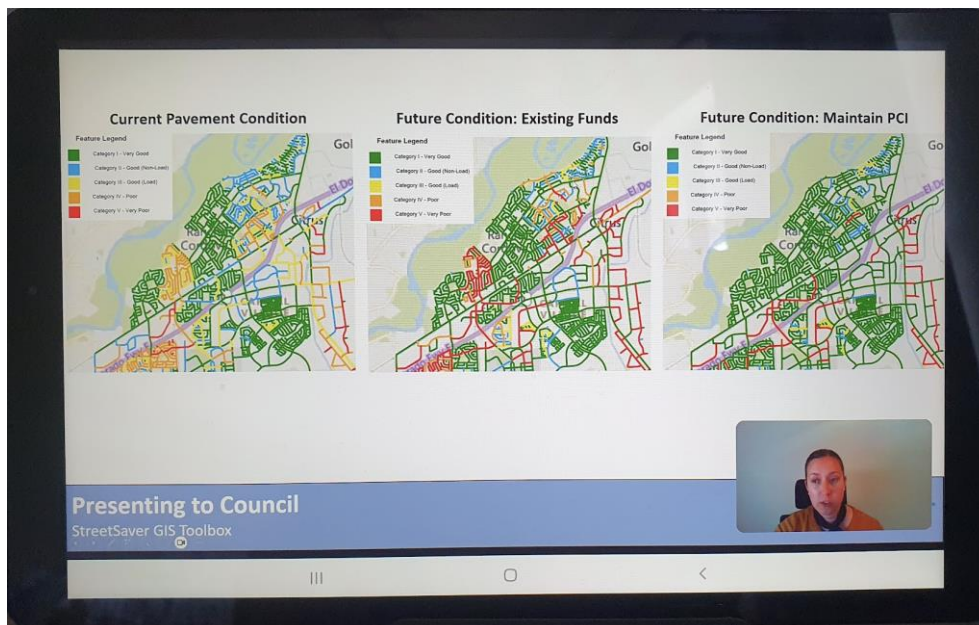


圖 14 MTC 的鋪面管理系統 StreetSaver®畫面截圖(2)

對於灣區各個地方政府而言，由於普遍人力不足的關係，鋪面

狀況調查無論是人員或是檢測車，通常都仍然需要委外辦理，MTC 每年辦理 2 次資格檢核，每次參加費用要 950 美金，考題由 MTC 和委外學術單位(本年度是加州州立大學溪口分校(California State University, Chico) DingXin Cheng 教授的研究團隊，先共同在城市裡選定適當的路段作為考場，考場上有各式各樣的損壞，先由 MTC 和學術單位於考前仔細勘查測量，準備好一份標準答案，再進行測驗。本年度的考場共有 23 處，參加檢核的人員必需在 8 個小時內完成所有的檢查並將手寫的原始資料繳回以供評分。檢測車的測驗會安排在另一個日期，以避免人員和檢測車同時測驗可能會發生的危險。

檢測人員資格考核每次通過的有效期是 2 年，兩年後參加 MTC 的訓練後，可再延期兩年 1 次，之後就要再重新參加考核了。對於檢測車，每間廠商需要有 2 人搭配 1 輛檢測車才能參加考核，檢測車通過考核後證書有效期也是 2 年，之後若操作人員都沒未變更，該 2 位操作人員參加訓練後，可以延長檢測車的認證資格 2 年，再之後檢測車就必須要再重新參加認證考核了。



The image shows a screenshot of a website for the MTC Rater Certification Exam. At the top, there is a blue banner with the text "Rater Certification" in white. Below the banner is a photograph of a person in a high-visibility orange and yellow safety jacket and a white hard hat, kneeling on a paved surface. Below the photograph, the text reads "MTC Rater Certification Exam" in bold black font. Underneath that, it says "Thursday, April 11, 2024 - Register Here!" followed by the URL "(https://events.streetsaver.com/MTCRaterVendorCertificationExamsSpring2024)". At the bottom, there is a small paragraph: "The Rater Certification Exam is designed to improve the quality of pavement management data collected in the field by pavement raters."

圖 15 MTC 的鋪面檢測人員與車輛資格考核網站截圖

整體而言，加州灣區的市區道路狀況普遍比臺灣差很多，但其養護經費的來源為燃油稅，在加油的時候收取部分附加費用，專門用來做道路維護用途。若要道路品質提升，需要更多的維護經費，每年 MTC 協助地方政府計算出提升道路品質所需要的經費，和民意代表溝通，找到民眾在油價以及道路品質間可以接受的平衡點，目前灣區平均的 PCI 值只有大約 65，而民意傾向的結果也是盡量維持現狀即可，有公開透明的決策作為基礎，民眾也明白為了不提高油價僅能接受現況，審查預算的過程中，大家也都能知道當經費發生變化的時候，未來整體路網的鋪面水準可能會發生什麼變化，由此可見鋪面管理系統除了是管理的工具外，更是良好的溝通工具。

Sui Tan 博士也建議我國可以參考 MTC，建立檢測車和檢測人員委外的認證考核制度，而在鋪面管理系統部分，則可以先找到與國道養護決策較為相關的幾項損壞態樣，建立類似 PCI 之綜合性量化指標。鋪面績效曲線是最難獲得的部分，或可參考其他國家累積多年的研究成果，校正調整為適合臺灣的預測模型。最重要的是，相關資料應盡可能以雲端方式備份儲存，避免因突發災害等意想不到的狀況，導致辛苦留存的資料遺失。

而在鋪面再生材料推廣及永續政策部分，Tan 博士建議善用鋪面管理系統並加強和民眾溝通，找到民眾可以接受的最低標準，盡可能減少施工量。或可以適度使用預防性養護工法，使鋪面能夠延壽，但不會產生刨除料。此外，因應氣候變遷，市區道路強化排水、以及精準維修保持路面良好狀態，都非常重要。

(二) 加州運輸部 Caltrans- 維護組鋪面業務辦公室

Caltrans 在鋪面業務部份，是在總部的維護組(Division of Maintenance)之下，設有專門處理鋪面業務的辦公室(Pavement Program)，其主管職稱為州鋪面工程師(State Pavement Engineer)，為負責鋪面養護業務之最高主管，雖然隸屬於總部，但管理鋪面業務的部門擁有獨立於總部之外的辦公室，包含鋪面管理系統、整修計畫、檢測、鋪面結構設計…等業務都隸屬於該部門的業務範圍，整個部門有大約 50 位工程師。但是，在 Caltrans 並沒有一個集中而大型的材料試驗室，他們的試驗室是分散的，在 Design 的部門(類似高公局規劃組)有一個試驗室是專門為設計需求服務，制定工程技術規範或進行規劃設計階段各項必要的試驗。工程品管作業的執行，如：驗收抽查、規範制定、設計審查這些，另由負責設計和施工的部門辦理，則是由他們各區工程處的品管試驗室負責，許多研究發展工作都是委由外部研究單位(如 UCPRC)來進行。



圖 16 Caltrans Office of Pavement Program 外觀



圖 17 筆者與 Caltrans 州鋪面工程師 Tom Pyle 合影

本次至 Caltrans Pavement Program 進行技術交流，共進行 5 場不同主題之會議，除整體概況與養護方針外，分別與相關的承辦人員討論了鋪面管理系統內涵、鋪面養護計畫制定、鋪面結構設計、鋪面檢測資料之蒐集與應用、永續鋪面發展方針等。



圖 18 筆者與加州鋪面管理系統承辦人 Venkata Mandapaka 合影



圖 19 筆者與 Caltrans Pavement Programming 團隊進行鋪面管理交流



圖 20 筆者(中)、楊士賢教授(右)與 Caltrans 鋪面結構設計工程師
Raghubar Shrestha 合影

依據 Caltrans 提供的簡報資料(參考資料[5])，Caltrans 共分為 12 個

區，整體路網長度共計 648,443 車道公里，但其中包含地方道路(City Street 及 County Roads)其主要管養工作及資金來源包括各郡的地方政府，另也有歸其他聯邦機構管轄之道路，由 Caltrans 負責管養的公路長度為 52,043.95 lane miles，換算約為 83,270 車道公里，約為我國高公局管轄國道鋪面養護數量(含開放通行之外路肩及匝道為 8,082 車道公里)之 10 倍。Caltrans 管養的公路約有 70% 為柔性路面，30% 為剛性路面，相對於我國而言剛性路面比例高上許多。加州近年來也面臨高交通量的壓力，必須盡可能減少生命週期內的養護次數，對於特別繁忙的路段他們選擇使用剛性路面，這和我國面臨高交通量時的決策完全相反。

加州的鋪面結構通常沒有開放級配(OGAC)，也很少使用多孔隙瀝青混凝土(PAC)。過去加州因為雨量相對較低，故無使用 OGAC 或 PAC 降低雨天路面水膜行程之必要，但近年來由於氣候改變，暴雨強度和頻率都有增加，過去的鋪面設計因為沒有雨天排水需要，有部分的路段甚至沒有設計橫向排水，面臨氣候改變在大雨時反而造成積水，以及嚴重的坑洞，故強化鋪面排水為當前最重要的議題之一。另外，加州目前已經非常廣泛地使用廢輪胎橡膠瀝青混凝土，因為加州平均氣溫低，但是溫差大，同一天內的高溫可能有攝氏 30 度以上，冷的時候則僅有 10 幾度，容易發生裂縫，他們面臨每年 4,000 萬顆廢輪胎去化的問題，故目前幾乎全部公路鋪面都是添加了廢輪胎橡膠的 AC，加州反而沒有刨除料去化的問題。大多數刨除料(包含含有廢輪胎橡膠的刨除料)都直接當成一般刨除料在使用，北加州目前還有許多空地會使用刨除料去鋪設農路、停放農用機具的廣場、私有社區內車道或停車場…等。北加州較少下雨，許多農路或空地直接使用 100% 的刨除料堆放整地就已經堪用，因此還有許多容納刨除料的空間。刨除料在面層的添加上限在 2014 年開始提升到 25%，在 2023 年則開始一個 100%RAP 的試辦(參考資料[6])。

為面對氣候變遷及溫室氣體減量的挑戰，Caltrans 參考 San Mateo County 的 Sustainability Ideas Bank，於 2024 年 4 月出版了一份永續鋪面策略集，並註明開放版權所有機關都可任意使用或修改(參考資料[7])。此處列舉一些柔性鋪面相關的項目：

- 在設計階段：長壽命路面設計、柔性鋪面上加鋪剛性混凝土

土、生命週期成本分析(LCCA)、生命週期評估(LCA)。

- 在材料選擇階段：使用刨除料(RAP)、再生粒料、瀝青中添加廢輪胎橡膠、廢輪胎橡膠瀝青混凝土中添加 10%RAP
- 在施工階段：重視平坦度(IRI)、推動環境產品聲明 (EPD)、減少施工機具燃料使用、溫拌瀝青混凝土。
- 在維護階段：使用鋪面管理系統。

Caltrans 的鋪面管理系統就叫做 Pavem，屬於路網層級應用工具(詳參考資料[8])，Caltrans 已經累積 40 年以上的完整歷史資料，並於 2017 完成完整的鋪面管理系統，開始採用鋪面管理系統輔助規劃預防性整修，現在相關的運作已經穩定。Pavem 裡面包含完整的決策樹，可以一次產生接下來 10 年每年預計整修的路段、建議的刨鋪厚度或預防性養護方式，每年由區工程處輸入實際整修路段和鋪面檢測資料後，間隔 2 年滾動檢討再產生接下來 10 年的整修計畫(也就是整修計畫每次都是 10 年長度，但比前一次增加新的 2 年(詳參考資料[9])。

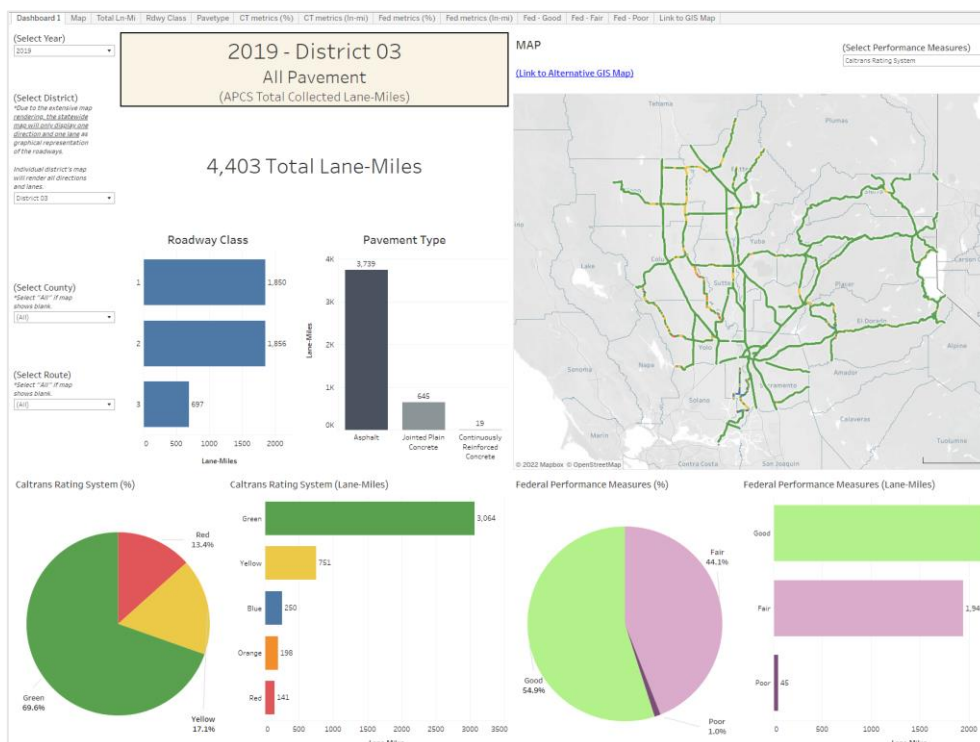


圖 21 Pavem 系統畫面截圖(1)-路網概況基本統計

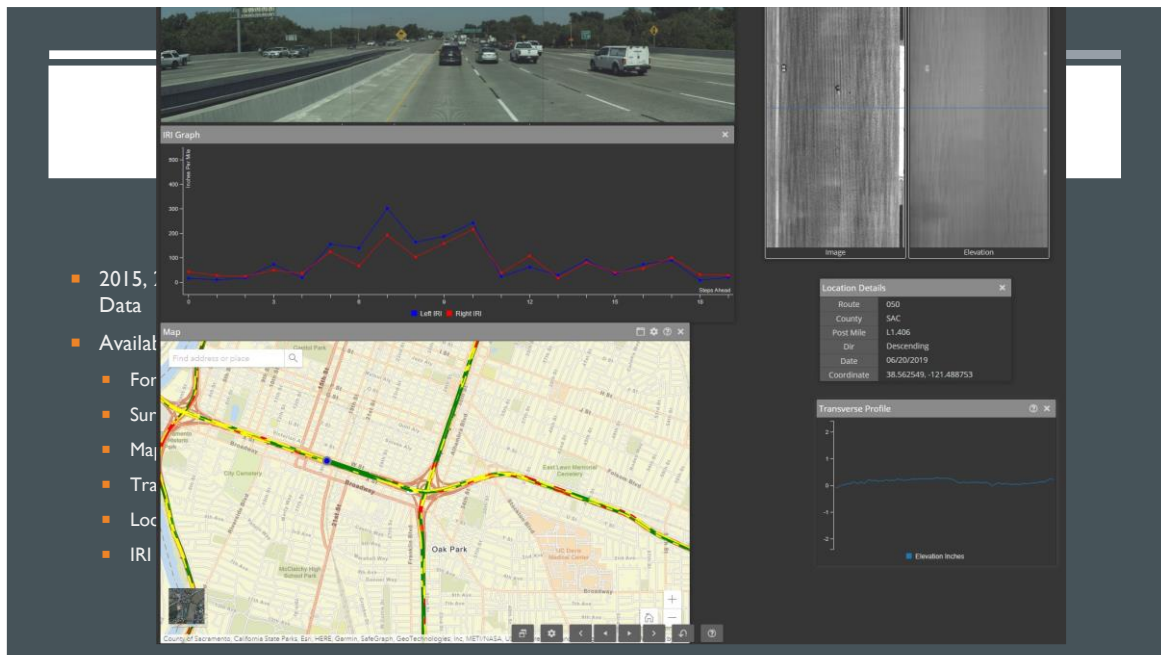


圖 22 PaveM 系統畫面截圖(2)-路段狀況查詢

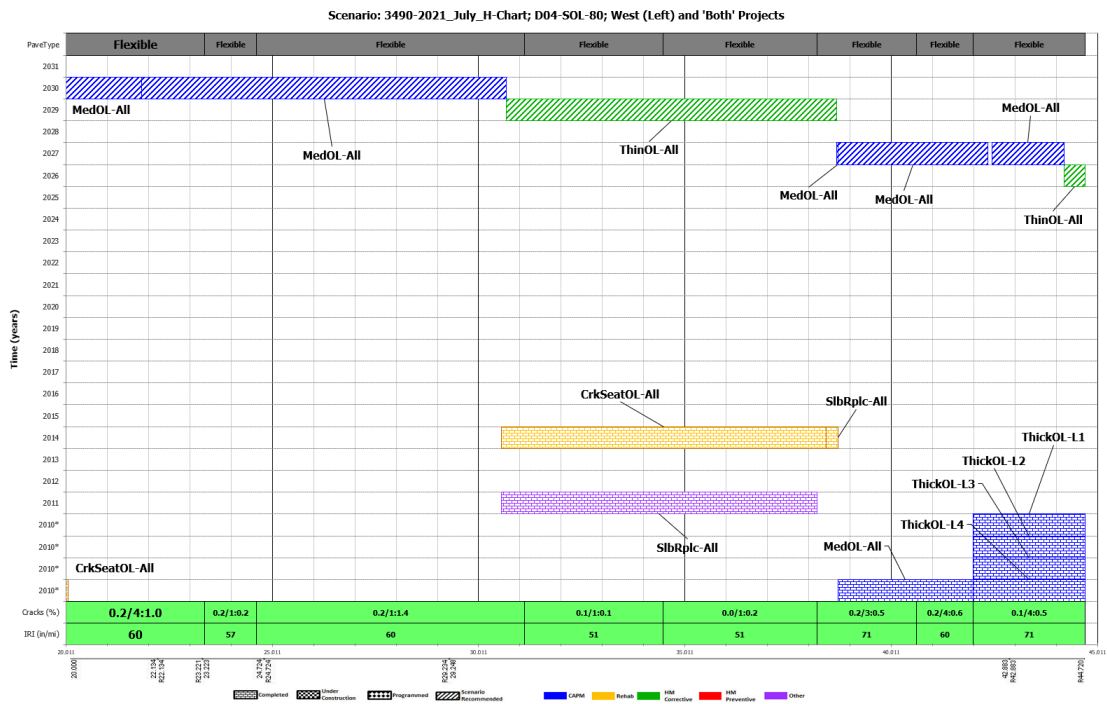


圖 23 PaveM 系統畫面截圖(3)-路段施工履歷查詢

在鋪面檢測(相當於我國高公局的鋪面定期調查作業)部分，Caltrans 也是以委外檢測為主，但是他們自己擁有一台自動化鋪面狀況檢測車，

負責每年抽樣比對委外檢測的成果是否正確。每年，鋪面檢測的團隊都會規劃檢測資料品質控制，以及比對抽查排程，確保檢測資料的品質。他們也會負責統計每年各項績效檢測的成果，除統計各區工程處的年度績效外並匯入鋪面管理系統以供分析之用。



圖 24 Caltrans 的 ARAN 自動化檢測車(圖片來源：參考資料[10])

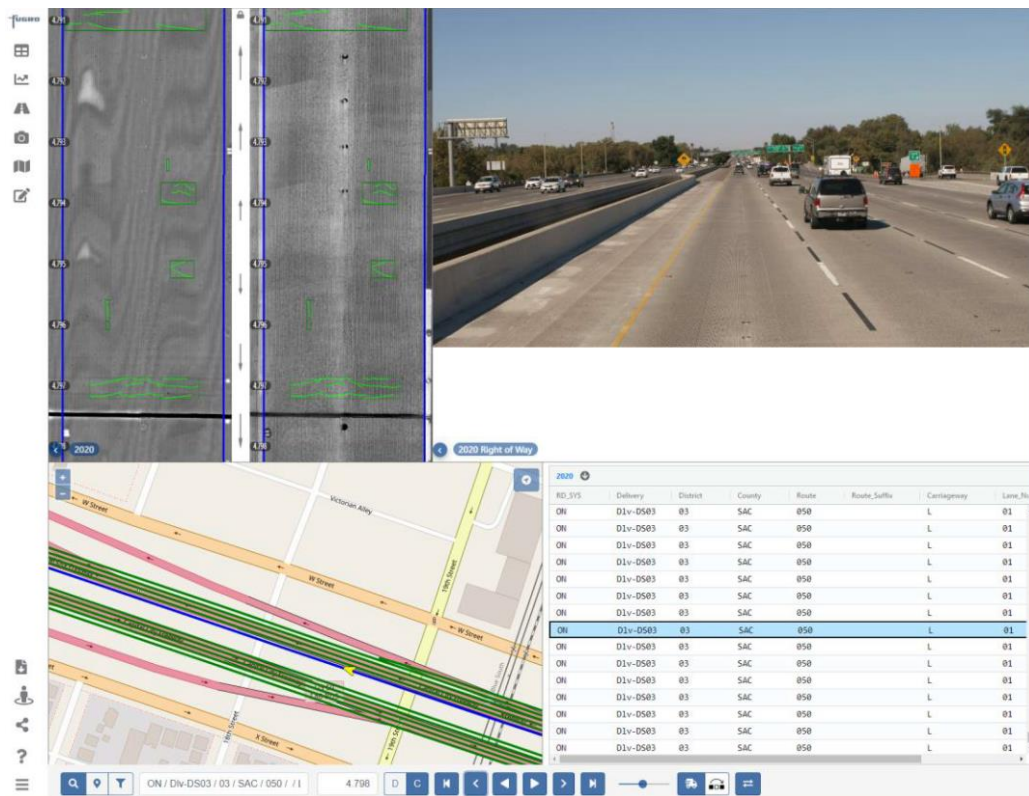


圖 25 Caltrans 的 LSMS 檢測成果檢視畫面(圖片來源：參考資料[10])

對於專案層級鋪面設計，Caltrans 以 AASHTO ME 為基礎，已經發展出命名為 CalME 的設計工具(詳參考資料[11])。筆者與 Caltrans 交流我國高公局目前執行中的鋪面管理系統設計及智慧化決策輔助發展方向，如導入自動化檢測車、收集施工履歷、運用撓度檢測成果發展專案層級設計工具、本土化 AASHTO ME 等，獲得許多肯定。因為相關的劣化模式都需要經過在地化校正，不可能直接被臺灣照抄使用，但是可以幫助高公局的研究團隊更快找到校正方向，Caltrans 同意高公局鋪面團隊可以參考他們現有 CalME 裡面的劣化模式，也表示願意遠距提供討論和研究意見。

The screenshot displays the CalME software interface with the following sections:

- Project Location:** District: 3, County: Yolo, Route: 5, Direction: North, PM Start: 10,000, PM End: 11,000, No. Lanes: 2. Project Length: 1.000 mi, Lane Miles: 2.000, Avg #lanes: 2.00.
- Traffic Count Information:** Location: R9.411-R10.807, AADT: 10,750, AADTT: 2,592, % Trucks: 24.1.
- Design Lane Traffic Loads:** Load Distribution (WIM Station): Group1b, Growth Rate (From First Year): 4.8%, First Year Axles / Design Lane: 4,843,894, First Year Trucks / Design Lane: 1,910,096. Design Life: 20 yrs, Total ESALs: 30,182,727, TI: 13.5 (rounded).
- Climate:** Climate Zone: Inland Valley, Suggested: Inland Valley.
- Pavement Structure:** Update Modulus for the Selected Layer Type Using Unconfined Compressive Strength (UCS): psi. Options: TS->CSS, TS->LSS, CTB-Class B. A table lists three layers:

#	Old	Layer Type	Age (d)	Material	Thickness (ft)	Modulus-E (ksi)	R-value	GF	Cost (\$/ft3)	Actions
1		HMA	90	2020 Standard HMA Type A Mix with PG 70-10 Binder and up to 15% RAP for non-PRS Projects	1.05	1,230.6	N/A	1.94	0.00	Edit Delete Insert
2		AB	N/A	2020 Standard AB-Class 2	0.50	45.0	78	1.10	0.00	Edit Delete Insert
3		Subgrade	N/A	2020 Standard CL	∞	9.9	16	N/A	0.00	Edit Delete Insert

圖 26 專案層級設計工具 CalME 截圖(圖片來源：參考資料[12])

經過本次前往 Caltrans 的討論與交流，可發現高公局對於鋪面管理之相關作為已經走在正確的方向上，雖然起步較慢但從定期調查、FWD、透地雷達應用、整修計畫、施工履歷、鋪面資產管理、匝道鋪面盤點，到經費運用效率 KPI 等，Caltrans 有的高公局已經正在發展中。Caltrans 鋪面辦公室的工程師們都表示，臺灣高公局鋪面團隊對於美國發展的 MAP-

21、各種材料規範、試驗方法以及最先先進的 M-E 鋪面設計概念也相當熟悉，他們非常驚訝，這對筆者而言是很大的肯定與鼓勵。

本次筆者也聯繫到任職於 Caltrans 第四區工程處的鋪面工程師 Shawn Hung(洪祥峰)博士，並前往他工作的辦公室拜訪，透過討論了解從不同層級角度看到的鋪面養護業務挑戰與可能的對策方向。本次拜訪的時候辦公室內的人很少，同樣是因為自疫情後就以居家辦公為主的因素導致。目前每周只需進辦公室 2 天，工作皆為責任制，全員均不須打卡。第四區工程處的位置在舊金山市區東北方的 Oakland 市區，距離 BART 車站也是走路約 10 分鐘的距離，員工如搭乘大眾運輸工具通勤每月可以領取 300 美元的車資補貼。



圖 27 Caltrans 第四區工程處辦公室大廳放置的 San Francisco-Oakland Bay Bridge 模型

Caltrans 各區工程處進行的鋪面養護工程分為兩種，一種是厚度 3inch 以內(大約 8 公分)的小型養護，每年由各工程處自己決定不用先做計畫，而另外一種是 5~7 年走完一循環的大型養護，厚度較大但通常為 1ft.以內，區工程處必須提報預計整修路段並規劃所需的分年執行預算，這種要預先規劃的計畫和經費就要再往上送審查，經過 Design Division(設

計組)及更高層確認，此類年度計畫都要提早很多送審過三關才能確定可用的工程經費。此兩種區分類似目前高公局鋪面養護也有小標(零星維修)和大標(整修工程)的區別。



圖 27 筆者與 Caltrans 第四區工程處鋪面材料工程師
Shawn Hung 博士合影

洪博士畢業於臺灣大學土木工程學系，之後到加州大學 UC Davis 攻讀碩士與博士學位，他的指導教授為 UCPRC 的主持人 John Harvey 教授。洪博士在 UCPRC 期間，長期研究 AC 刨除料的應用。他認為 RAP 若添加量不過高(加 20%以下)，不容易發生績效明顯變差的問題。以北加州的條件而言，在瀝青混凝土內添加 RAP，對於鋪面的抗車轍性能會有正面效果，雖然近年因氣候變化雨量增加，而刨除料的抗水敏感性較差，但若新生瀝青膠泥添加量足夠且種類選擇正確，仍可以維持預期的績效。加州目前在刨除料的處理上，並沒有根據不同等級道路來源分別堆放，

只有在使用前確認每一批刨除料都有混合均勻而已。他們的刨除料通常都已經含有廢輪胎橡膠粉末，跟普通的刨除料混堆放、再生再生利用，已經超過 10 年迄今沒有發現明顯問題。加州進行瀝青混凝土配合設計時是採用成效試驗，當刨除料含量不高時，無論是否加入刨除料，都可以使用相同的配合設計方法。然而，含有刨除料的瀝青混凝土並不適合以臺灣常用的馬歇爾配合設計方法選擇最佳含油量。

筆者與洪博士討論到我國過去經驗認為刨除料耐久性不佳的情形，並分享高公局目前執行中之刨除料試辦計畫內容。對於高公局的刨除料試辦計畫規劃，洪博士相當肯定，規定保固一年容易達成，可以讓廠商建立信心，此外，高公局為了解決改質瀝青混凝土刨除料而採行的成效配比設計觀念也相當正確。洪博士認為添加刨除料後績效明顯變差的可能原因如下：

1. 刨除料處理的問題：用來生產的 RAP 沒有拌合均勻，導致拌合成果難以控制；或是生產和配合設計時，用來設計和生產的 RAP 材料性質不一致，導致拌合廠無法按照配合設計來量產。
2. 瀝青膠泥種類選擇不適合：目前臺灣的瀝青膠泥分類缺乏精確的性能標示，無法對應到適用的溫度或環境條件，造成設計時難以預估選用不同型號瀝青膠泥的效果。若能改 PG 系統或者另外為適合的環境溫度做分類可能會有幫助。
3. 計價制度問題：在加州不論有無添加 RAP 只要符合契約規範都是一樣的價錢，但臺灣若要求加了刨除料以後就要折價，可能導致廠商偷加超量刨除料。未來如果能朝向長期成效契約，一次簽約 10 年讓施工廠商也需要負責巡查和養護，讓廠商承擔更大的責任，可能可以防止廠商偷加過量刨除料。

洪博士表示，當前他們工程處遇到的最大挑戰是愈來愈高的交通量。雖然過去他們通常可以在日間施工，也不太需要在意封閉交通多長的時間，但近年來交通量愈來愈大，有些比較繁忙的路段都只能夜間施工，目前夜間施工的比例已經高過日間施工了。此外，夜間施工也常常需要

注意替代道路的安排。有一次他們不小心將往同一個方向的 4 條公路在同一個晚上全部封閉部分車道施工，結果大塞車，引起極多的民眾陳情，還好他們是技術人員，不需要直接回復陳情人，只要按照陳情案件的內容到現場前往確認後回報即可，會有專門回應陳情的單位依據他們的回報答覆陳情人。

(三) 佛州運輸部 FDOT-州材料辦公室

相對於 Caltrans，FDOT 在其總部內並沒有負責鋪面管理的相關部門，全部的鋪面管理業務都是由州材料辦公室(State Material Office, SMO)來辦理。佛州運輸部總部位於塔拉哈西(Tallahassee)，而州材料辦公室位於蓋恩斯維爾(Gainesville)，有時會被翻譯成甘村。Gainesville 是佛羅里大大學(University Florida)的所在地，是一座大學生，有許多古蹟和豐富的自然生態，面積不大，從城市的一端到另一端大約只需要 20 多分鐘的車程。佛州的「州材料辦公室」名稱和組織配置看起來很像我國公路局的材料試驗所，他們要負責所有公路上新工與養護會使用到的材料(包含標誌牌、鋼筋、混凝土…)，不僅限於鋪面，新工和養護所有的工程品管、驗收抽查、規範制定、設計審查等都是他們的工作範圍。但鋪面養護業務的特有的定期調查、儀器檢測、整修計畫…等等，也是全部由 SMO 負責。在 FDOT，鋪面相關的研發工作，雖然也有外部的學術單位來承攬，但學術單位的人員會派人在 SMO 內部工作，所有的設備和資料都保存在 SMO 內部，沒有像 Caltrans 那樣和一個如 UCPRC 那樣專注辦理研究發展的外部機構密切合作。

本次筆者是先聯繫到來自臺灣的 Oliver Chung(鍾閱文)博士，透過其介紹才得以拜訪 SMO。鍾博士畢業於國立中央大學土木系，之後到佛羅里達大學深造取得博士學位後，進入 SMO 工作。鍾博士的專長是水泥混凝土，但他表示在 SMO 內部所有的正職工程師經常都會在不同領域間輪調，大約每 1~2 年就會更換一次執掌，以便每個人都有機會學習到不同的材料試驗，因此他先前曾經從事鋪面材料的業務，之後可能也還會

再負責其他領域的業務。SMO 的辦公室所在地點在 Gainesville 的郊區，建築物多為平面分散，有一點類似我國高公局的泰管園區。SMO 和 Caltrans 不同，並沒有因為疫情而改成居家辦公，因此他們一直都是需要到辦公室上班(需要打卡)，但是有非常彈性的工時計算方式，每天正常的上班時間最短 8 小時、最長為 10 小時，一週需滿 40 小時，員工可以自己決定要上班 5 天或 4 天。



圖 28 筆者與 Oliver Chung 博士在 SMO 園區入口處合影



圖 29 筆者與佛州 SMO 首長 Sue Zheng 合影

FDOT 的公路路網分成 7 個區，公路里程面積約為 45,500 lane miles，可換算 72,800 車道公里，約為我國國道鋪面養護數量之 9 倍(詳參考資料 [13])。佛州的氣候高溫、多雨、夏季有颶風侵襲，當前也正面臨高交通量的挑戰。在 FDOT 管轄之公路路網內，有 97% 為柔性路面，3% 則為剛性路面，此比例恰巧與臺灣國道相同。與我國國道更接近的則是鋪面結構組成，為了減少雨天路面水膜的生成，在高等級公路的全主線上都有鋪設 OGAC。和我國的高速公路一樣，為了顧及民眾的行車需求，刨鋪道路只要先完成密級配就可以開放通車，但就算是尚未回鋪面層的路段，實際行駛的感受也仍然相當平整。



圖 30 佛州 I-10 公路尚未回鋪面層路段(左)及警示牌面(右)

依據筆者的觀察，佛州的公路因為鋪面和臺灣一樣有加鋪 OGAC，且氣候條件接近，鋪面上的損壞態樣也很接近，常會看到剝脫、事故刮痕，而很少見到裂縫。但佛州並未特別強調區分表面上鋪的是 PAC 和 OGAC，只有對抗滑能力定期進行監測，當特定路段需要提高抗滑能力時，級配就會調整得較接近所謂的 PAC。此外，佛州公路在排水能力良好的匝道不會加鋪 OGAC，因為匝道有坡度和彎度，不易施工且 OGAC 薄層非常容易剝脫。我國目前對於 OGAC 並沒有一套明確的配合設計規範可用於選擇最佳含油量，只有高公局曾經參考 PAC 和日本的規範編訂了一

份暫行版並以特訂條款的型式納入工程契約中。本次筆者也向 SMO 索取了 OGAC 選擇最適含油量的方法，「派盤法」的試驗規範(參考資料[14])，跟高公局目前暫行版中使用的烤盤法類似，但是操作上更為簡便。



圖 31 SMO 試驗室 OGAC 最適含油量之派盤法操作情形

目前佛州也和臺灣一樣有刨除料過量堆積的問題，公路鋪面很早以前就已經開放瀝青混凝土中也可添加 RAP，並且沒有規定添加上限，只有要求一定要符合配設計規範，此外，開放級配中不可添加 RAP，若使用高黏度的改質瀝青，也不得使用刨除料(參考資料[15])。我國的改質瀝青膠泥沒有使用 PG 分級，故目前無法精確定義，但依據高公局委辦研究案的測試，我國高速公路目前使用的改 IV-F 瀝青膠泥經常相當於 FDOT 定義的高黏度改質瀝青。為了符合品質規範，目前瀝青混凝土面層若有添加 RAP，普遍都是面層加 20%，而底層則可以加到 40%。此種結論與我國過去經驗也很接近。對於運用刨除料的議題，Jim Musselman 有提出一些想法。刨除料不需要依據來源分堆存放，是否含有廢輪胎橡膠也不是很重要，不必分開額外堆置，只要當成一般的刨除料處理即可，但在運用前一定要注意必須先將刨除料混合均勻，且配合設計和之後量產要用同一堆混合均勻的，並且要嚴格管控生產流程，不可以添加過量。



圖 32 筆者與 FDOT SMO 瀝青實驗室主管 Jim Musselman 合影

FDOT 在路網層級鋪面管理的觀念與目前做法上，與我國高公局也非常接近。他們使用的績效指標包含平整度(IRI)、裂縫(Cracking)、車轍(Rutting)；且相關的標準也比聯邦的標準要更高。FDOT 對平整度的要求是不得大於 125 in/mi.，大約是相當於 2.0 m/km；裂縫有計算一個裂縫指數，依據發生在輪軌跡和其他位置的裂縫嚴重程度加權計算，由 10(完全沒損壞)開始扣分，必須高於 6.5 分以上；而車轍深度則是不得大於 0.44 in. (約為 1.12 公分)，這三項指標必須全部都合格才算合格，而每年的目標則是合格的里程數高於全路網的 80%。這種制定養護目標的方式和高公局有類似，高公局對於平整度的目標值是不得高於 2.5 m/km 的路段，平整度合格的里程數要高於全路網的 97%。但因為高公局目前沒有自動化檢測車可以用於量化裂縫和車轍，因此只能用平整度來訂定標準，目前高公局所轄之國道，在 2.0 m/km 以上的比例有高於 90%，顯示我國國道平整度跟美國公路之平整度不相上下。高公局養護手冊中，規定車轍深度不得高於 13mm，否則就需要採取維護措施，和 FDOT 規定的 0.44 in. 也很接近。在裂縫部分，高公局養護手冊目前並未有裂縫率的規定，但配合自動化檢測車應用，目前正在結合養護手冊中裂縫種類、嚴重程度分級的定義，計算出適當的單位面積裂縫嚴重程度量化指標。

Pavement Condition Survey Data Acquisition

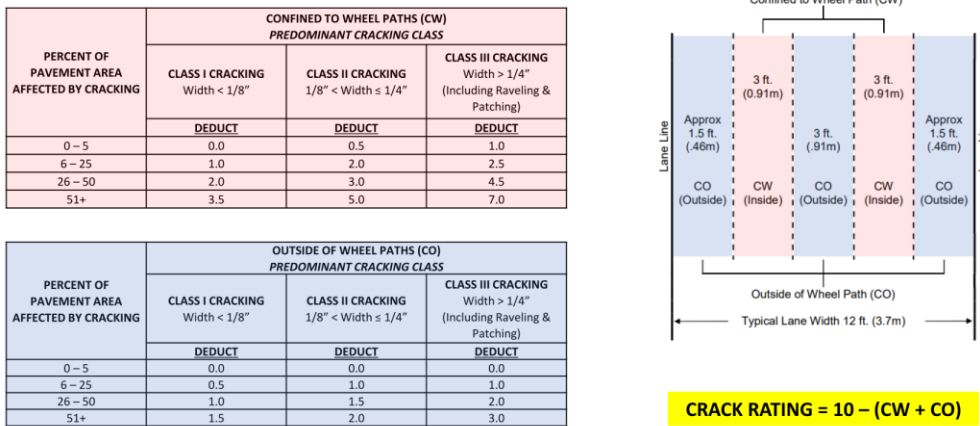


圖 33 SMO 鋪面管理用之車轍分數計算(圖片來源：參考資料[13])

Pavement Management – Decision Making

- FDOT deficient pavement standards
 - Cracking < 6.5
 - Rutting < 7 (> 0.44 in laser or 3/8 in manual)
 - Ride dependent on posted speed
 - ≥ 50 mph, Ride Rating < 6.5 (>125 in/mi IRI)
 - < 50 mph, Ride Rating < 5.5 (>166 in/mi IRI)
 - Lowest of three ratings determines overall section rating (PCR)

- HPMS standards
 - Good = All three “good”
 - Poor = Two or more “poor”
 - Fair = All other combinations

	Good	Fair	Poor
IRI (in/mi)	< 95	95 – 170	> 170
Rutting (in)	< 0.20	0.20 – 0.40	> 0.40
Faulting (in)	< 0.10	0.10 – 0.15	> 0.15
Cracking (%)	< 5	5 – 20 asphalt 5 – 15 JCP 5 – 10 CRCP	> 20 asphalt > 15 JCP > 10 CRCP

圖 34 FDOT 鋪面績效目標及聯邦管理目標(HPMS)比較(圖片來源：參考資料[13])

FDOT 為了能夠更精確地量化鋪面服務績效，2023 年開始引進自動化檢測車(LCMS)，SMO 共採購 5 台，4 台用於負責整個州高等級公路路網的年度檢測，另 1 台則專門用於復測比對。我國目前也已有顧問公司引進 LCMS 檢測車，但委外檢測費用高昂，故目前高公局仍然正在尋找

合適的自動化檢測車。筆者對於他們選用的損壞態樣有提出疑問：佛州的鋪面上有 OGAC，那麼剝脫(Raveling)應該也會很常見；此外，多雨的環境下應該會有一些修補坑洞留下的補綻(Patching)，為什麼沒有被納入他們的績效指標中呢？會產生這樣的疑問，是因為當前高公局選用合適的鋪面檢測車時，正面臨難以辨識剝脫以及尚不能確定如何量化補綻對鋪面績效的影響性。關於此疑問，Kyle Kroodsma 表示，其實有納入考量，但因為以前他們也面臨跟高公局一樣的困難，現況是將剝脫和補綻全部都和 Cracking 合併算做同一類，但近期和他們合作研發的 Geogia Tech 大學 Prof. James Tasi 研究團隊已經提出可以影像辨識並量化紀錄剝脫嚴重程度的方法，因此他們 2024 年收集資料後，就會把剝脫獨立出來計算。



圖 35 筆者與 SMO Pavement Management Engineer, Kyle Kroodsma 合影

高公局目前每次只能產生 2 年的整修計畫，但 FDOT 因為有績效預測模式的輔助，因此可以一次產生之後 7 年的整修計畫，且每 1 年重新運算更新 1 次，提供給各區工程處作為參考。但是，和 Caltrans 不同，FDOT 的鋪面管理系統內因為沒有決策樹，只有用過去累積的歷史資料推算出各區的劣化曲線，因此 FDOT 提供給各區工程處的整修計畫草案，只有告訴他們每一年度應該要維護的里程數有多少還有經費上限，不但

沒有告知他們要維護的位置在哪裡，也沒有提供建議維護的厚度或建議的處置規模(treatment)；跟高公局目前鋪面整修概算公版的概念相當接近。各區工程處可以自行決定要不要按照 SMO 提供的建議養護里程數去做維護，但每年他們也會依據年度檢測資料，檢核各工程處花費了分配到的養護經費後，執行率是否達標、績效是否有達標、整體路面狀態是否有進步或退步。這樣的執行方式也跟高公局目前辦理養護考評時鋪面類的評分概念很類似。Kyle Kroodsmas 提到，FDOT 使用鋪面管理系統的目的，是為了更好的分配資源，使整個路網的績效可以普遍維持在好的狀態，讓各工程處鋪面狀態的落差不要一直那麼大，而是透過合理的經費分配，讓各區工程處的鋪面服務績效可以逐漸趨於一致。

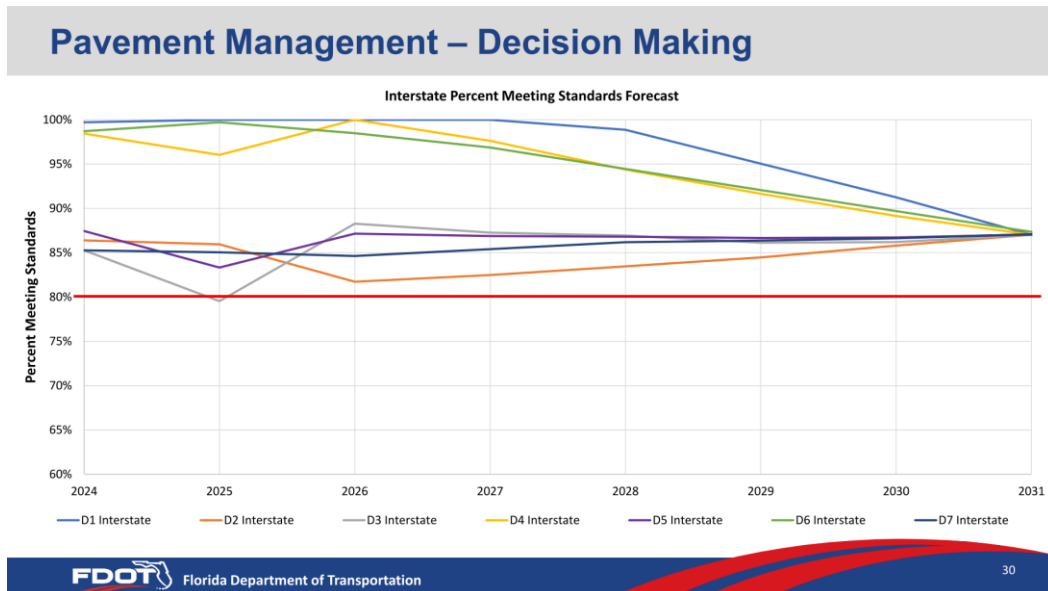


圖 36 SMO 預測各區工程處鋪面績效變化(圖片來源：參考資料[13])

LCMS 檢測車可以同步收集 IRI 和鋪面損壞狀態，車子前方是慣性式雷射平坦儀，後方則是用裂縫偵測用的雷射設備。每年都會請原廠技師負責保養及調校，確保設備運作之穩定性。檢測執行的時候，只需要 1 人同時負責開車和操作，到達定點後按下開始鍵，就不需要再控制車上的筆記型電腦，只需專心開車即可。



圖 37 LCSM 檢測車的裂縫偵測雷射



圖 38 LCSM 檢測車的前方的 IRI 雷射檢測設備



圖 39 筆者與 SMO 負責維護 LCMS 的技師合影

筆者非常羨慕 SMO 有如此先進而便利的設備，仔細詢問後，才發現原來 2024 年也是 SMO 首年開始運用績效模型進行鋪面管理並開始調整他們的養護經費分配方式，與高公局的現況落差其實不大。但是，FDOT 有相當充足的研究經費，SMO 有非常完整的非破壞檢測設備，也有非常寬裕的經費可以依照需要自行開發新的檢測設備或試驗儀器。非破壞檢測團隊不只關注鋪面而已，凡是裝設在道路上的設備都是他們檢測的範圍，目前面對氣候改變，暴雨頻率和每次降雨量的增加，當前面臨的挑戰主要在基礎設施耐洪及排水韌性的提升、雨天行車安全(主要是雨天標誌標線可見度)、以及預防天坑發生。本次也看到許多和標線有關的檢測設備。此外佛羅里達州的地質條件不佳，許多區域路基都是石灰岩(Limestone)容易水解流失，地下水位變動也很大。目前 SMO 有定期使用車載式透地雷達尋找天坑，每年會做 1 次全路網的掃瞄，近期則正在測試使用 FWD 撓度檢測路基強度的應用，針對一些天坑發生機率較高的

路段，在暴雨過後透過撓度檢測確認路基是否已經恢復足夠的承載力，再開放恢復通行。



圖 40 筆者與 SMO 非破壞性檢測工程師 Guangming Wang(左 1)合影



圖 41 SMO 自行開發用於模擬標線雨天反光度之設備
(左:檢測設備，右:讀取資料用的電腦)



圖 42 試驗室內的石灰石路基樣品(裡面常能看到生物化石)

SMO 的撓度儀(FWD)、鎖輪式抗滑儀(SN)這兩台設備我國高公局都有且定期運用中。談到撓度儀運用的經驗，負責檢測的技師表示確實和我國一樣因為交通量太大，導致進行 FWD 檢測的時候必須顧慮工作風險，FWD 並不是全路網檢測，而是在需要做改正性整修(類似我國高公局深層修復)路段，進行專案層級設計前蒐集資料用；每次檢測的時候，會跟著標誌車和緩撞車保護，必要的時候甚至會封閉交通才檢測。



圖 43 SMO 的 Dynatest 鎖輪式抗滑儀

SMO 的試驗室可以依據不同目的分為 3 個部分，首先是為了品管而設置的試驗室，雖然各區工程處也有自辦或委外辦理相關的材料品質檢驗，但 SMO 會親自負責 7 個工程處每一件工程的抽樣比對，工作量非常大。



圖 44 SMO 試驗室(品管區)的粒料樣品



圖 45 SMO 試驗室的 SGC 設備(製作瀝青混凝土試體用)



圖 46 SGC 瀝青混凝土試體

第 2 個部分則是為了設計階段蒐集資料和撰寫材料規範的試驗室。佛州有許多材料都仰賴進口，特別是粒料，因此必須先掌握這些不同地區進口的粒料是否符合工程使用。SMO 每年都會提供一份合格材料清單，

列出可用的材料產地、廠牌等，以供設計部門參考或提供得標廠商進貨時參考用。



圖 47 待測試的進口粒料

SMO 也會就即將辦理工程的路段，蒐集現地的土壤樣品或就預計施工的材料、工法等，確認是否可行。例如，佛州經常有路基鬆散或地下水位過高的問題，於是建立試驗坑(Test Pit)，在設計階段先將施工地點的土壤取樣回試驗室，並放在試驗坑裡加上不同高度的地下水位，再給予不同載重，進而了解應如何調整工程設計。目前共有 3 組試驗坑。



圖 48 SMO 試驗室路基試驗坑(test pit)

第 3 個則是為了研究發展用途的試驗室，也是規模最大的部分。對於新材料和新工法，SMO 長期都秉持著必須實際測試才能收集到最真實資料的理念進行相關研究。加速試驗設備非常多，筆者參觀期間就看到至少 5 台的天候加速模擬艙，可將樣品放在艙內，加速模擬材料樣品受到天候影響老化後的變化。在鋪面部分，有 2 台重車模擬加速試驗設備 (Heavy Vehicle Simulator, HVS)，可以在幾個月內完成幾年時的交通量的輾壓，快速得到材料受到重車交通量輾壓後的反應。本次前往時，其中一台 HVS 正好在測試感應線圈填縫的耐久性。



圖 49 SMO 的 HVS 控制室



圖 50 SMO 的 HVS 設備



圖 51 其中一台 HVS 內部正在測試感應線圈修補方式

FDOT 也有非常大規模的試驗道路，位於 301 號州公路上。不同於我國經常選擇交通量偏少的地方進行測試，該試驗道路是具有一定比例重車交通量的路段，目前正同時進行 52 組剛性路面和 13 組柔性路面試驗。試驗道路的起點配有動態地磅，但測得的載中資料不會用於超載取締，也沒有 LED 顯示板讓用路人知道自己的車中，而只是用來蒐集真正的重車交通量資料。每一組試驗道路鋪設完成後，都會持續追蹤好幾年，常常都是追蹤到「生命週期屆滿」為止。這也是 SMO 為何要選擇有一定重車交通量的路段。各個試驗路段連續，更可以用來比較不同的材料、工法在同一交通量下的變化。筆者在 SMO 考察期間，剛好遇到其中一處柔性路面要重新開始測試新的鋪築工法，因此可以看到測試道路上各種感測設備的安裝及施工過程。



圖 52 筆者前往 SMO 柔性路面試驗道路觀摩施工情形



圖 53 SMO 技師介紹試驗道路之監測設備

(四) 加州大學鋪面研究中心(UCPRC)-Davis

UCPRC (Davis)為學術單位，但與 Caltrans 長期密切配合。該研究中心係由 John Harvey 教授主持，與 Caltrans 長期合作已有 40 年以上，主要進行鋪面相關研究工作，柔性和剛性鋪面的研究都有，也發展許多應用工具，包含其鋪面管理系統 PaveM、專案層級鋪面結構設計工具 CalME、還有許多節能減碳對策和鋪面材料規範都是出自 UCPRC。研究團隊的成員不是只有教授和學生，還有 4 位專職的研究員，分別負責不同領域的研究主題。本次考察的重點，除了解試驗室的設置目的、有哪些設備、試驗規劃方式等，並觀摩試驗室工作執行方式，及觀察學術單位的研究議題如何與道路主管機關的鋪面管理之需求相互配合，以達成雙贏互利的最佳結果。

UCPRC 有相當完整的材料試驗設備，以及加速試驗設備。其中維護費用最為高昂的就是重車加速模擬設備(HVS)，目前共有 3 台。最早的一台試驗設備來自南非，後來的兩台都是在美國組裝，3 台設備都可以運作。本次前往拜訪的時候，有一台試驗設備已有規劃即將開始進行測試，另 2 台則是剛完成測試，目前正在評估結果中。在 HVS 所在位置旁邊，是非常廣大的鋪面試鋪場地，各種新材料、新工法、斷面結構等都可以在這個空地進行測試。研究人員的會議室和辦公室都是貨櫃屋，可以用拖車依需要移動位置。

為了節省測試新材料、新工法所需的時間，UCPRC 會將預計測試的材料或斷面結構連續鋪築在同一個區域，並同時進行 HVS 試驗。HVS 可以加速交通量載重，但在天候的影響部分，雖然罩住以後才用輪胎輾壓，可以控制溫度但沒辦法控制濕度，無法達到加速模擬天候影響的效果。試驗過程一般而言都是要持續幾個月，讓載重的輪胎重複在受測的鋪面上輾壓，中途有時候偶爾也會遇到下雨，但是這些濕度變化都是無法控制的，因此 HVS 的研究結果和實際在路上鋪築還是可能有不一樣。儘管如此，能夠將好幾年的交通載重濃縮在幾個月內完成，仍然對了解新材料的服務績效與耐久性相當有幫助。



圖 54 UCPRC(Davis)最早的一台 HVS



圖 55 UCPRC 的另一台較新的 HVS



圖 56 UCPRC 已安排進行測試的 HVS



圖 58 測試完成以後可打開斷面檢視深層損壞狀況

HVS 測試完成後，若有必要，UCPRC 會將原本鋪設試驗鋪面結構的位置切開，以便檢視深層的損壞狀況。有時候損壞不會只有發生在表

面，而是由深層向上反映，或者也有可能上層和下層損壞的嚴重程度發展不同。例如上圖照片中，可以清楚看出裂縫是由底部開始發生，而下層的凹陷情況也比上層鋪面更明顯。UCPCR 也有撓度儀(FWD)，以及非常完整的鋪面材料試驗室設備。撓度儀可以在 HVS 測試前後於試鋪場地上檢測鋪面結構的各層強度。



圖 59 UCPCR 的撓度儀

在 UCPCR 的材料試驗室裡面，可以發現他們非常重視所有工作者的職業安全衛生。每一個房間裡面都有提供免費的手套、防護面罩、護目鏡…等等裝備。而且這些防護裝備的配置都是配合該項工作可能會有的風險。例如，篩分析試驗和洛杉磯磨損試驗會有非常大的噪音，搖篩機旁邊就會放著耳塞、烘箱的旁邊會有放置隔熱手套。有些容易接觸到有機溶劑的試驗裝置，例如洗油篩分析，該設備放置在一個玻璃箱裡面，設備運作中的時候檢測人員可以關閉玻璃門，盡可能減少接觸到有機溶劑的機會。



圖 60 UCPRC 瀝青材料試驗設備



圖 61 製作完成的 SGC 瀝青混凝土試體



圖 62 試驗室內提供的防護用具(1)



圖 63 試驗室內提供的防護用具(2)



圖 62 放在玻璃櫃裡面的洗油篩分析設備



圖 63 可以「關門」的搖篩機

UCPRC 的對於各種水泥混凝土新材料、新工法的試驗，都是循序漸進。先做很小的方塊試體，接下來就是更大的柱狀試體，接著就是一塊塊在室外場地做試鋪，很像人行道但其實是測試中的水泥混凝土，最後就是到鋪面試驗場，尺寸大到車子可以開上去，最後階段就是和 Caltrans 合作，實際在公路上做測試。試驗團隊表示，他們因為有許多測試的機會和場地，等一個材料能夠真的放到公路上的時候，無論是對施工方式或是材料的特性通常都已經有蠻高的把握了，不容易發生出乎意料的損壞。Harvey 教授的團隊是屬於「實作派」，特別重視研發成果的實用性，希望能給 Caltrans 和其他委託他們研究的政府機關帶來能夠實際應用的成果。



圖 64 體積最小的立方試體



圖 65 養治中的長方柱狀試體



圖 66 室外水泥混凝土試鋪

在節能減碳的議題上，Harvey 教授的研究團隊開發了一套可以搭配 Caltrans 專案層級鋪面設計工具的生命週期評估(LCA)工具，命名為 eLCAP。該軟體使用上非常方便。除了施工、材料、運輸與機具一般 LCA 工具會考

慮到的項目外，也可以選擇將開放通車以後營運維護期間使用者部份的排放量納入，交通量的部分直接和 Caltrans 的 WIM(動態地磅)資料庫連動，只要輸入預計設計的路段就可以直接帶入交通量資料。在施工機具部分，美國 U.S. Environmental Protection Agency(類似環境部)有一個網站叫做 Emission Standards Reference Guide for On-road and Nonroad Vehicles and Engines，該資料庫中可以查到各種 On-Road 的施工機具排放資料(EMFAC)，UCPRC 研究團隊再透過派員到多個鋪面工，地實際紀錄各種運輸車輛和施工機具運作的時間，便能完整建立有關施工機具的排放量。eLCAP 目前尚未正式由 Caltrans 公布上線使用，所以是由 Harvey 教授在會議室內的螢幕上像筆者展示相關介面與功能，但未來在設計階段的時候就會搭配 CalME 一起用，甚至碳足跡計算也會變成任何設計都必須執行的一個步驟。

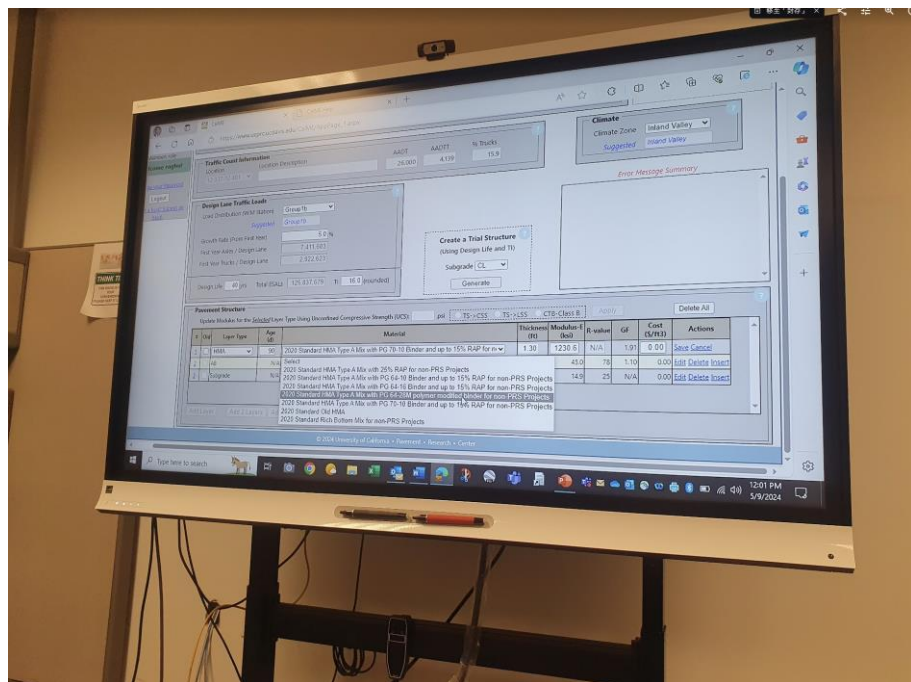


圖 67 eLCAP 操作介面展示

筆者和 Harvey 教授約好見面的前兩天，Harvey 從國外出差返回加州，返家後發現確診新冠肺炎，但還好病情不嚴重，仍有在約好的日期與筆者見面。Harvey 教授分享了許多 UCPRC 成立以來和 Caltrans 合作的歷史，大約每 10 年會一個循環，總是有時候機關的長官會不太想要做研究或是覺得自

己已經發展的夠好了，但那個時候學術單位就是要努力撐下去，因為所有的設備維護都需要很高的費用，比如光是 HVS 可能每年都需要 50~60 萬台幣來進行基本的保養。Harvey 教授說，他身為學術單位認為最重要的就是要認真聆聽機關的需求，多溝通，考慮他們的需要，並且在機關內找到適當的人溝通，那個人不必一定要是最大的長官或未必是那個握有決策權的人，但是只要機關內有人能夠聽得懂、知道尊重專業，那麼機關一定會進步。一定要有願景、有熱情，然後願意一直持續投入去做，無論是最順遂的時候或是不順利的時候都不能放棄，最後慢慢就會看到成果。這樣的一種態度，無論是做什麼事情都相當有啟發性；目前國內許多政府機關也都傾向尋找學術單位合做進行研究發展，若能夠真的清楚機關需要，相信許多學術單位也都會像 Harvey 教授的研究團隊那樣，樂於與傾聽機關需求並研發真正能夠符合機關運作需要的工具。



圖 68 高公局鋪面團隊與 UCPRC 團隊主持人 John Harvey 教授合影

(五) 其他專家學者訪談及 EDC-7 永續鋪面論壇

本節為筆者在本次研究過程中對其他 3 位相關專家學者進行訪談之紀錄，包括加州大學柏克萊分校 Arpad Horvath 教授、加州州立大學溪口分校 DingXin Cheng 教授以及 FHWA 資源中心 Geffery Ger (葛正復) 博士。

(1) 加州大學柏克萊分校 Arpad Horvath 教授

Arpad Horvath 教授目前跟 UC Davis 合作在建立營建工程材料的 LCA 方法，以便指導各類主要的材料或工程應如何估算 LCA。本次是因為成功大學楊士賢教授剛好在筆者在美期間安排訪問 Horvath 教授，故得到一同前往訪問 Horvath 教授。目前我國正在建立營建工程材料碳足跡的簡易計算工具，這個工具可以用來初步估算工程設計方案如何選擇比較好，除了可以讓業主了解所辦工程的排放狀況，也可以回饋在設計階段，協助決策選擇較減碳的設計方案。根據實際工程盤查的經驗，在不同的工程中，由不同的營造廠執行，機具會有不同廠牌，材料生產也都是由不同的協力廠商執行，各家廠商在製程中的能源消耗與碳排放量落差很大，為解決資料庫內同一種工項數值有太多種的問題，建立碳足跡資料庫時不可以直接將所有盤查結果全數納入，而應該採用一些具有理論基礎的混合型估算方式，藉由統一的工具，讓不同設計單位和業主在為設計方案計算碳足跡時，可以有一致的範圍設定，進而提供決策者一致的選擇和比較基準。然而，Horvath 教授也提醒，當資料庫建立完成後，因為不是實際盤查得到的資料，因此相關的內容都必須加以審查和驗證，甚至需要持續的更新，才能確保資料的可靠度和參考價值。

對於未來政府機關可以如何降低工程的碳排放量，Horvath 教授表示，其實許多具規模的材料商都已經有自己做產品碳足跡的潛力，設計時可以請他們自行提供相關資訊 (EPD)，或者廠商投標的時候，就可以提出他們採用的材料其實可以降低排碳 (有點像是可以提出縮短工期評選加分的概念)，但機關仍然必須審查他們所提是否正確。當機關有要求，並且提供標準化的填表 (報價) 格式，各種材料生產商都有有自己降低產品碳足跡的方式，廠商習

慣之後自然就會去降低工程的碳排放量。Horvath 教授也提到，他認為未來如果是由廠商自行提供設計資料碳足跡的話，可以像報價的單價分析一樣的架構讓廠商“報價”，機關就可以審核廠商所提的方案碳足跡估算是否合理。

至於做工程 LCA 真正能幫助減緩暖化或氣候變遷嗎？Horvath 教授非常誠實地說：不知道，但他認為進行 LCA 可以減少浪費。要環境永續最重要的觀念就是不要使用過度的設計、減少施工，延長設施的使用壽命，也可以節省經費，減少資源到消耗，雖然可能不知道到底節能減碳了多少，但做 LCA 或是要求廠商進行 EPD，總比什麼都不做好一些。



圖 68 高公局鋪面團隊與 Arpad Horvath 教授(中)合影

(2)加州州立大學溪口分校 DingXin Cheng 教授(線上訪談)

加州州立大學溪口分校 DingXin Cheng 教授是 MTC 的鋪面顧問，本次筆者有幸經過 MTC 的 Sui Tan 博士介紹認識 Cheng 教授，Cheng 進行許多預防性養護、刨除料、廢輪胎橡膠瀝青混凝土的實務研究。雖然因溪口大學路途遙遠無法前往，但拜科技進步所賜，以線上訪問方式向 Cheng 請教刨除料以及廢輪胎橡膠瀝青混凝土設計與施工方面的問題。

有關我國當前正在討論刨除料應如何處理才適當，以及堆積之過剩刨除料去化的利用方式。Cheng 教授表示加州目前暫時沒有刨除料堆積的問題，但不能保證以後永遠不會有。已經堆置很久的刨除料或是已經重複再生好幾次的刨除料到底能不能再用，他認為刨除料就算再利用過很多次，仍然就是一種材料，重點在於是否均質還有是否有經過適當的配合設計，選擇使用正確的新生瀝青膠泥下去拌合再生，就可以確保再生瀝青混凝土鋪面的品質。建議臺灣未來若要多運用刨除料，可以讓瀝青膠泥改採 PG 標示，再生的時候比較容易選擇適當的瀝青膠泥種類。

有關刨除料儲存方式，加州目前沒有特別去區分是什麼等級道路刨除料，但是會盡量把不同 PG binder 的 RAP 分開，產出和再利用盡量同一地區，然後每一堆都盡量不要堆太高才使用。使用前會有重新打碎和過篩的過程，刨除料就會比較均勻。一般來說加 15%最多，上限是 25%。地方道路用得比較多，公路則是最近才開始，目前正在推廣的是使用 10% RAP 加在廢輪胎橡膠越級配(Gap Grade)中。含有橡膠的 RAP 沒有分開堆置的必要，已經做過許多研究，只要當成一般的刨除料再利用就可以了。

廢輪胎橡膠的運用方式在加州已經非常普遍，運用方式是將廢輪胎橡膠粉末經過造粒技術壓縮後，添加在瀝青膠泥中，用量目前約為全部瀝青膠泥重量之 20%(比臺灣只能佔全部瀝青膠泥重量的 2%~3%多很多)，把廢輪胎粉末當成改質劑的概念。

加州運用廢輪胎橡膠如此廣泛，但是並沒有遇到臭味的問題。若先採造粒技術將廢輪胎橡膠在工廠內處理過，臭味會降低，另外就是溫拌技術在加州也已經非常普遍，幾乎可以直接適用所有熱拌瀝青混凝土的技術規範，因此可以大幅降低使用廢輪胎橡膠的臭味問題。

(3)FHWA 資源中心 Geffery Ger (葛正復)博士

美國聯邦公路管理局(Federal Highway Administration，簡稱 FHWA)是美國運輸部(Department of Transportation，DOT)下屬的一個機構。FHWA 的主要職責是監管和協調全國的公路系統，確保美國的公路和橋樑的安全、效率和可持續性。本研究訪問的葛正復博士任職於美國聯邦公路管理局

(FHWA)的資源中心(Resource Center)，資源中心為提供技術支持和專業知識的重要部門，旨在幫助州和地方交通機構提升他們的公路系統管理和運營能力，通過提供技術支持、培訓和資源，幫助各州和地方政府應對各種交通運輸挑戰。



圖 69 筆者與 FHWA 的葛正復博士合影

葛博士個人的專長為橋梁結構，但氣候變遷調適及相關的研究發展為他目前主要的工作領域，他表示，各設施提升韌性的概念都一樣，近年來 FHWA 投入非常多研究資源，致力於提升各類設施應對氣候變遷的韌性(resilience)。在面臨各種災害時，關鍵是找出這些設施在不同災害下的脆弱性(fragility)，例如在降雨量增加的情況下，設施可能會遭受多大的損壞。然而，脆弱性曲線(fragility curve)往往是最難確定的，尤其是對於那些未曾發生過的情況。目前，失效概率(probability of failure)是主要的研究標的。然而，得到

準確的脆弱性曲線非常困難，主要的原因為許多極端災害事件發生頻率低，缺乏充分的歷史數據來建立可靠的脆弱性曲線；此外，災害的不可預測性也造成研究的困難，未來災害的強度和性質難以準確預測，增加了評估設施脆弱性的複雜性。以雨量為例，可以用 200 年一次、300 年一次來界定雨量的大小，但是許多自然災害的發生並沒有足夠的數據，發生機率根本都像是隨機發生，導致很難量化描述其嚴重程度。他們試著用「能量」的概念來描述災害，討論當設施承受一定的能量時，會如何損壞，但不同地理位置、環境條件和設施類型都會影響脆弱性，這些變數使得標準化的脆弱性曲線難以制定。提前預估未來災害的強度非常重要，道路主管機關的也應盡可能採取措施使設施的失效概率盡可能降低，這一過程本質上是一種風險管理(risk management)的概念，旨在通過提高設施的抗災能力來減少其受損害的可能性。要在災害發生前就提早做好準備，現在沒有遇到不代表以後不會遇到，但是等遇到才開始投資改善補強往往已經來不及了。

(4) FHWA，EDC-7 (Every Day Counts 第七輪)論壇活動

美國聯邦公路管理局(FHWA)於 2010 年推出了「快速推廣創新計劃」(Every Day Counts，EDC)，旨在加速創新技術和實踐的採用，提升美國公路系統的效率、安全性和可持續性。EDC 計劃每兩年推出一輪，針對當前交通運輸領域的挑戰和需求選擇特定的創新主題。EDC 計劃自推出以來，通過推廣各種創新技術和實踐，顯著提升了美國公路系統的效率、安全性和可持續性，對全國交通運輸領域產生了深遠影響。2024 年 6 月份已是 EDC-7 的成果發表，相關研究是在 2022~2023 年完成，筆者也參加了 EDC-7 針對永續鋪面主題部分的活動(FHWA Climate Challenge & EDC-7 EPDs for Sustainable Project Delivery National Symposium)。

這場活動為實體和線上同時舉辦，連線參加的人約有 120 多人，活動中筆者看到許多先前在佛州 SMO 和 UCPRC Davis 學習時看到的研究成果在這裡發表，包含 Harvey 教授展示的 eLCAP 鋪面工程碳足跡計算工具。由主辦單位報告內容，更可以感受到 FHWA 在鼓勵積極創新研發上的投入。

在這場論壇中，可以看到各州代表發表他們參與永續鋪面的作為、推

動狀況等，許多積極創新提案都是跨機關、跨州合作，政府機關、州政府以及學術單位一起完成。他們不但每兩年都會舉辦創新提案的研究成果發表活動，更會積極投入辦理教育訓練，讓所有的有需要的州政府有機會能夠了解和學習如何應用，更會持續的追蹤各種重要關鍵技術或創新作為的推動成效。例如今年永續鋪面活動中最強調的氣候變遷挑戰及營建工程 EPD 研究議題等，本期 FHWA 就有贊助超過 30 個研究計畫，有 27 個不同的州政府及主管機關一起參與，規模非常大。

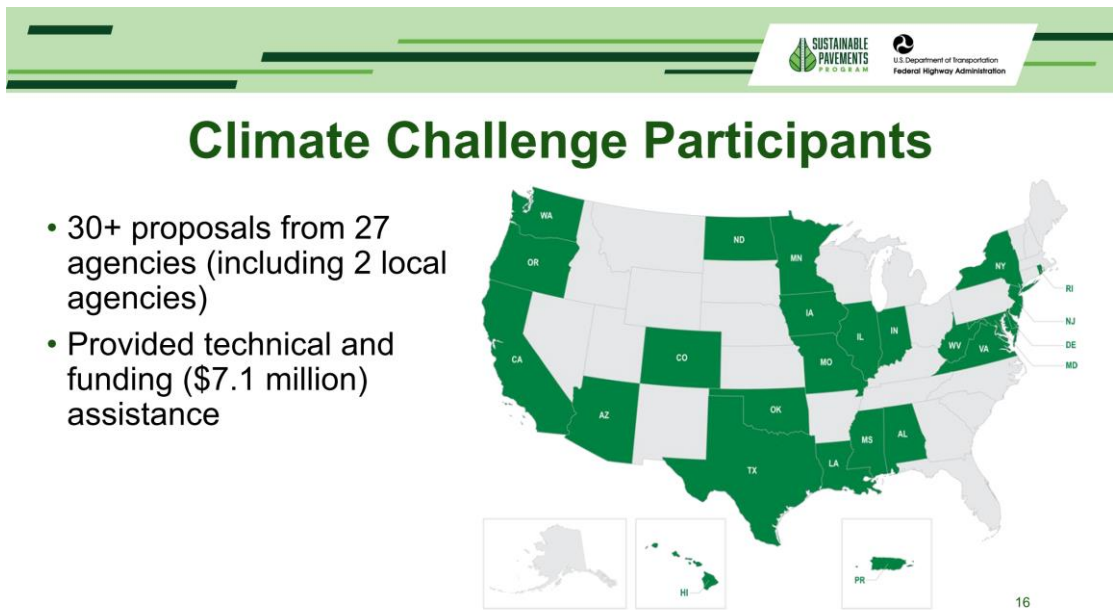


圖 70 投入 FHWA 永續鋪面相關研究計畫之機關
(圖片來源：參考資料[17])

參、心得及建議事項

一、心得

(一) 橋面的管理與伸縮縫平整度

在橋梁段鋪面的管理上，無論是加州或佛州，大多數的橋梁均為無覆蓋 AC 混凝土的剛性橋面，無論市區道路或公路均是如此。Caltrans 和 MTC 的工程師都認為若橋面被 AC 覆蓋，無法清楚檢視橋面的劣化狀況。而佛州的則有部分橋面(通常為長度 0.5 mile 以內的短橋)會覆蓋有 AC 薄層；但他們同樣認為橋上的鋪面因為其生命週期並不像路堤段的鋪面一樣衰減，也無法用相關的模型進行預測，因此不應該屬於鋪面管理的範圍，而是將橋上鋪面視為橋梁的一部份，歸屬橋梁管理系統內進行維護管理。

整體而言，加州和佛州的橋梁伸縮縫銜接處都並沒有特別平整，行車跳動大多與我國接近，甚至比我國的國道要更加明顯，但因為地形條件差異，並沒有像國內部分路段有短橋伸縮縫密級的狀況，也因此兩州的 DOT 都表示並未有相關的陳情，也不認為伸縮縫平整度是特別需要討論的議題，伸縮縫都是有損壞了可能影響行車安全才處理，也從未考慮過要去做特殊的整平處理。不過，他們的橋都是大橋，數量也沒有很多，沒有短橋伸縮縫的問題，也沒有管伸縮縫行車跳動的問題。民眾反映的話，他們就回覆說因為橋一定要有伸縮縫，不平也沒辦法。伸縮縫一律是壞了才修。剛性橋面通常有縱向鋸槽以增加抗滑能力及降低噪音，且版塊長度較長至少都有 10 米以上，國內剛性路面以短版塊為主，故相較之下行車舒適度就容易受到影響。

美國很大，光是加州和佛州就有許多不同，相信其他的地方也會各自有許多不一樣，因此不應該直接說「美國就是怎樣怎樣」，但僅僅這一次的旅行就讓筆者發現許多與臺灣相同和不同之處，收穫非常多。

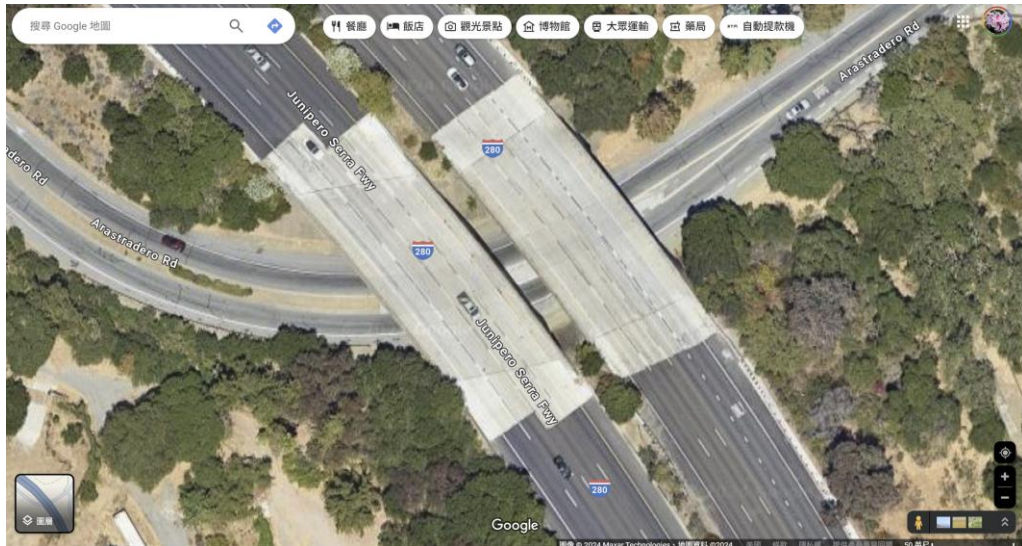


圖 從 Google Map 就可以看到剛性橋面

(二) 跨文化交流中的啟示

在此次美國學習之旅中，筆者深刻體會到了文化衝擊。雖然加州和佛州的文化仍是略有差異，但整體而言在這兩地停留期間，感受到了當地公務人員的工作方式和態度與臺灣有很大不同。除了重視團隊合作外，他們也相當勇於表達自己的意見。大多數的決策都是經過討論後才做出的，並不拘泥於形式。

筆者多次旁聽各單位的工作會議，無論是實體還是線上的，會議過程中總是沒有人會保持沉默或說「沒意見」。每個人對別人的發言同意或不同意，都會說出自己具體原因。特別是在加州，主管(主席)和與會者(同仁們)之間完全沒有隔閡，他們不會推來推去誰坐前面誰坐後面，也不會因為講化的人是主管或比自己更資深而不敢表達意見，甚至打斷別人講話也是允許的。筆者前往拜訪 Caltrans 的時候，是辦公室的主管在台上報告，工程師坐在下面問問題，旁聽的人也一樣問問題，他們的提問充份表現出來他們對簡報議題的興趣。在這種以技術為主、重視意見交換的會議中，人與人之間的溝通更加直接，也更有效率。每個人都不怕受到指正或挑戰。這使筆者體會到，工作會議不應該像典禮一樣進行，而是應該記住開會的目的，這樣才能更有效地解決問題。

一開始，筆者比較不敢主動開口講話，幸虧有 MTC 的前輩 Sui Tan 邀

請我一起參加他們的工作會議；而王華弘博士也帶著筆者參加幾場 ASCE 給青年工程師的交流活動、還有去看顧問公司辦給學生的徵才說明會等，才讓筆者見識到原來也可以這樣開會。後來參加 MTC 的教育訓練，也發現學員也是有問題立即提出，甚至有些是很基本的問題(例如詢問鋪面常用的縮寫定義，或是操作步驟沒看到要求再示範一次，或是詢問一些很基本的規定內容)，但授課講師都非常耐心回答，而且鼓勵大家提問，她對每一個問題的回應都是以「這是個好問題」開始。後來有機會和其中一位講師聊天，她說喜歡大家提出各式各樣的問題，因為若學員不提問她們就不會知道原來鋪面系統的使用者對有些步驟有疑問，那就失去了進步的機會。

後來筆者前往 Caltrans 和 FDOT 拜訪時，也放大膽開始主動提出問題，在對方簡報時若有疑問就立即打斷提出，遇到與我國情況相似的地方也會立刻分享臺灣的經驗，這樣的主動反而讓對方可以留下更好的印象。其中一場次因為有事先拿到簡報資料，讀過以後第一次和簡報者見面寒暄過後就直接開始提問，結果他和我以討論的方式完成整場簡報，氣氛非常好。

(三) 期待更多的技術交流與合作

高公局與 Caltrans 雖然有技術交流協議，但過去多年來僅限於橋梁業務交流。本次是首次有鋪面相關業務人員前往交流。Caltrans 鋪面辦公室對於本局的國道鋪面管理發展及高公局目前的研究發展狀況、相關人員的專業能力等均表示肯定。交流過程中，他們表現出對我國高速公路養護管理方式的高度興趣。在 FDOT 進行交流時，佛州材料辦公室的反應也非常類似。尤其是因為佛州與我國在氣候條件以及刨除料再生再利用議題部分面臨類似挑戰，此次考察過程中有許多重要的技術意見交換。藉由本次出國學習交流，可以了解到 Caltrans 和 FDOT 在鋪面管理上的先進技術和管理經驗。例如，Caltrans 的鋪面辦公室展示了其在鋪面壽命延長方面的研究成果，而 FDOT 則分享了其在刨除料再生利用方面的創新方法。這些經驗對我們未來在臺灣的鋪面管理和維護工作具有重要的借鑒意義。

鋪面工程是公路設施中每年養護經費占比最大的項目，而國內鋪面工

程管理以及相關技術發展已經達到與先進國家對等交流的水準。在與 Caltrans 和 FDOT 的交流中，我們分享了臺灣在國道鋪面管理和維護方面的經驗，這些經驗也得到了對方的肯定和認可。這樣的交流不僅促進了技術上的互通有無，也加深了彼此的理解和合作。

此次赴美學習之旅，讓筆者不僅了解了美國加州和佛州在鋪面工程管理方面的先進經驗，也認識到我們自身的優勢和不足。

未來若條件許可，希望我國政府機關可以投入更多研究發展資源，並鼓勵相關研究成果投稿至國際研討會發表。跨文化交流和合作是提升自身技術水平和管理能力的重要途徑。未來，我們應該更多地參與國際交流，學習其他國家的先進經驗，同時也向世界展示我們的成就。同時，也相關出席人員也應盡量主動開口介紹我國各類設施養護管理作為，通過各種交流場合維繫我國與其他先進國家的連結。臺灣的進步值得被世界看見。

二、研究總結

本次至美國加州及佛州進行短期研究，對於主要的 3 項核心議題均有充分的意見交流。整體而言，目前高公局之國道鋪面管理系統及養護管理機制精進之發展方向相當正確，應持續進行相關研究，爾後更可適度增加各種新材料、新工法(例如:刨除料再生運用、溫拌、冷拌再生等)之實地測試，累積實際經驗，俾得到更加可靠的測試成果。以下分就 3 項核心議題提出建議之對策：

(一) 國道鋪面管理系統精進

此部分依照執行架構與思路，分為資料取得、研究議題、應用工具及預期產出成果等 4 階段。

1、資料取得

要建立一個鋪面管理系統，資料取得是基礎工作之一。首先，必須

收集並整理路段的基本資料，並依據管理的目的不同，切分成路段單元、區段單元以及特性分區。路段單元為基礎的劃分方式，是用於紀錄檢測資料的最基本單元長度，以國道而言就是每百公尺為 1 個路段單元。而區段單元則根據不同的地理特性和使用特性進行劃分，包含同樣的鋪面結構、同樣的鋪面種類、兩座橋之間，每次刨鋪整修的時候，同一個區段單元都會被安排在連續的幾天內完成刨除重鋪。特性分區則進一步細化每個區段的特徵，例如天候條件、交通量條件等，並將數個特徵接近的區段單元組合在一起，例如：國道 3 號高雄路段、國道 1 號五股路段等。

鋪面狀況資料的取得則是鋪面管理的重要根據，需要的資料有：陳情案件統計、績效檢測(IRI、抗滑、FWD)及量化的鋪面損壞檢測成果等。透過收集陳情案件統計，能夠瞭解用路人對鋪面問題的反應及容易發生損壞或不平的位置熱點，進而及時調整維護策略。此外，定期進行績效檢測，包括國際平整度指數(IRI)、抗滑性能(SN)和透地雷達(GPR)等測試，這些數據有助於全面評估鋪面的狀況和性能。目前高公局已在養護手冊內有規定定期調查和定期檢測，但目前面臨交通量高、檢測風險高的困境，仍然缺乏適當的自動化檢測設備搭配相關調查作業的進行。自動化檢測車的應用，可以量化鋪面損壞，為決策者提供精確的數據支持，建議列為後續之研發重點，選擇適當的檢測車來配合養護與決策的需要。

氣象資料的收集與分析對於了解氣候對鋪面壽命的影響至關重要。降雨量、溫度變化及風速等數據可幫助預測鋪面的老化與劣化情況。交通量的資料則透過動態地磅(Weigh-In-Motion, WIM)取得，這些資料包括車輛重量、車流量等，能夠分析交通對鋪面損壞的影響。國道沿線已有氣象站設置，可以提供各項必要的歷史氣象資訊。

施工履歷是另一個重要的資料來源，包括施工日期、位置及厚度，以及配比及材料試驗等信息。這些資料不僅能夠反映施工質量，還能夠提供未來維護和重鋪時的重要參考。成效試驗報告則用來評估施工效果，確保鋪面質量達到預期標準。

2、研究議題

當前高公局在資料取得部分的發展與完成度已經很高，下一步就是朝向鋪面管理系統所需的相關研究議題持續發展。基本資料的盤點與分區是研究工作的起點。對所有基本資料進行盤點和分析，確保資料的完整性和準確性，並進行有效的區域分區，是提升管理系統精度的必要步驟。目前國道鋪面管理系統已經完成路段單元的劃分，建議就區段單元及特性分區的切分進行相關研究，探討如何切分並納入鋪面管理系統內。

決策樹模型的建立是鋪面管理系統要從單純的「資料庫」進化為「管理系統」的核心關鍵，建議國道養護上可以針對不同的整修規模(例如：不處理、輕度、中度、深度)建立決策樹，這樣可以根據實際鋪面狀況制定合適的維護策略。再者，決策樹需要考慮不同的分區、主線、匝道及橋梁等因素，也可以針對不同結構和使用特性制定具體的決策。

績效曲線(PMS 模型)的建立，則是智慧化決策輔助的精髓，也是最難建立的部分。績效曲線須能夠根據不同的分區、主線、匝道及橋梁等，進行長期的鋪面績效預測，量化隨著時間過去鋪面績效將會如何下降。過去國內在績效曲線的研究上，多半會傾向從歷史資料找出某特定路段的整修間隔，但這種方式因為外在影響因素太多，較難據以找到合理的績效曲線。建議可以參考加州的做法，從美國 AASHTO ME 的基本模型做為基礎開始，配合國內資料進行本土化及充分考量國內損壞態樣，將相關模型做適當的簡化，以符合國道鋪面管理系統需要。

除了路網層級的 PMS 模型，專案層級模型之重要性也不可忽略。可以考慮結合 FWD 數據、鋪面結構、氣候和交通量，發展並建立各種國道鋪面結構的老劣化曲線(ME 模型或 Pure M 模型)，能夠預測鋪面的老化情況。這些模型能夠提供更準確的鋪面壽命預測，並使整修的厚度及材料選擇更有科學根據。

而在運算模式的發展外，自動化檢測車的應用很需要綜合性指標的支持，這樣才能高效地進行鋪面狀況檢測和評估並讓決策者可以輕易地了解鋪面的優劣變化。最後，配合設計及品管方法的優化能夠確保施工質量和長期性能。這些方法需要不斷更新和完善，以適應不同的施工環境和需求，確保設計預期和施工成果能相吻合，也是非常重要的議題。

3、應用工具

前述之各項研究議題可以共用資料庫，並發展出下列之應用工具，包含：鋪面狀況及基本資料查詢展示、鋪面管理系統(路網層級決策工具)、鋪面結構與厚度設計工具、配合設計審查及驗駐廠作業守則、工程碳足跡計算(專案層級)工具等。

開發鋪面狀況及基本資料查詢展示系統，可以提供鋪面狀況和基本資料的可視化展示，便於決策者和管理者使用。這些系統應該具備友好的用戶界面和強大的數據處理能力。鋪面管理系統(路網層級決策工具)的建立，能夠提供路網層級的決策支持，幫助制定維護和管理計劃。這些工具應該具備強大的數據分析能力和決策支持功能。鋪面結構與厚度設計工具將可根據不同的交通和氣候條件，提供最佳的鋪面設計方案。這些工具需要具備靈活的設計能力和精確的計算功能。工程碳足跡計算工具的開發，能夠評估每個施工項目的碳排放，推動綠色施工和環保措施。這些工具應該具備強大的數據分析能力和環境影響評估功能。而設計審查及驗駐廠作業守則的制定，能夠確保施工過程中的設計觀念正確和拌合過程與施工過程之穩定性，是一切預測模型可以有效運作的根本。

4、預期成果

相關應用工具開發完成後，如能納入每年養護作業循環中使用，將可做到量化呈現養護 KPI、智慧化產生後續年度之整修計畫草案的，並可以進行路網維護成本及碳足跡概估，以及各標整修工程的專案層級碳足跡估算。

量化呈現養護 KPI，能夠通過數據展示養護效果和績效，提升管理透明度。這些 KPI 應該根據不同的維護目標和標準進行設計和調整。智慧化產生後續年度之整修計畫草案，能夠利用智能化系統，生成後續年度的整修計畫草案，提高計畫的科學性和可行性。這些計畫應該考慮到各種影響因素，從而提供全面的數據支持。路網維護成本及碳足跡概估，能夠提供路網維護的成本和碳足跡概估，為決策者提供全面的財務和環境影響評估。這些估算應該根據不同的維護方案和標準進行設計和調整。

專案碳足跡估算，能夠進行專案層級的碳足跡估算，推動施工單位採取低碳措施，減少施工過程中的碳排放。這些估算應該根據不同的施工方案和標準進行設計和調整。如此一來，我國鋪面管理系統的層次將可有大幅度的提升。

(二) 鋪面再生材料推廣及永續政策

表 2 彙整了本研究總結為推廣鋪面再生材料及實施永續政策所需之各項各項目標、考慮項目和可能對策。可分成：減少過度施工、延長每次養護間隔、降低單次施工之碳排放量，以及將節能減碳充分納入決策考量等 4 個目標。要達成這些目標，分別有一些考慮項目，及分別之可能對策。

表 2 鋪面再生材料推廣及永續政策之目標與可能對策

目標	考慮項目	對策
減少過度施工	整修計畫	鋪面管理系統(Right time & Right place)
	整修工法選擇	ME design 或 Pure Mechanical design (Right method)
延長每次養護間隔	瀝青混凝土配比成效	更精確的瀝青膠泥性能要求(如:軟化點,黏滯度...) 改良式馬歇爾平衡配比設計
	品質管控	平坦度：IRI 納入驗收、鼓勵使用新型鋪裝機、內部激勵措施 駐廠品質管理：提供適當訓練、工作手冊、稽核制度 優質施工廠商：改採最有利標、成效式契約
	坑洞緊急填補效率	統一調度機制 強化人員訓練 使用防水臨時修補材料 移動式再生修補車、預鑄式瀝青磚
降低單次施工之碳排放量	混合料產製	使用部分再生材料：使用刨除料 生產過程降低碳排放(冷拌、溫拌)
	施工過程節能減碳	降低運輸過程排碳 提高機具能源運用效率 推動鋪面工程相關之 EPD

充分納入決策考量	資料庫與估算工具	將常用工法與材料碳足跡參考值納入 PMS 資料庫 專案層級 LCA 工具
----------	----------	---

1、減少過度施工

為減少過度施工，必須要有完善的整修計畫，若有發展完全的鋪面管理系統，將可以提供正確的整修時機和適當的整修路段(Right time & Right place)，通過科學的鋪面管理系統，能夠在合適的時間和地點進行必要的維護和修復，避免過度施工，從而減少資源浪費和環境影響。考量到鋪面管理系統之基礎包含基本資料、鋪面狀況調查、決策樹與績效曲線目前都已有相關研究進行中，發展鋪面管理系統應具有高度的可行性且應持續進行相關的發展與應用。

此外，選擇合適的整修工法，將能夠提高施工效率和效果，減少材料的浪費和施工次數，從而達到節能減碳的目標。國內雖然沒有辦法建設如 HVS 這種大型加速試驗機具，但仍可搭配 FWD 等非破壞檢測設備，分析不同結構之力學反應機制，進而發展出本土化之 ME 模型或純力學模型，藉由老劣化曲線，可輔助進行專案層級的整修工程鋪面結構設計(Right method)，也具有相當高的可行性。

2、延長每一次養護整修間隔

下一個目標是延長每一次養護整修的間隔。要做到延長每次整修的耐久度，可以從改善瀝青混凝土配比成效開始。提高瀝青混凝土的配比成效能夠延長道路的使用壽命，減少養護次數，從而節省材料和能源。可行之對策包含更精確的瀝青膠泥性能要求，例如，在契約中規定瀝青膠泥之軟化點、黏滯度等，並於結合 Superpave 的特性採取改良式馬歇爾平衡配比設計，在現行規範不須大幅變動的前提下，最佳化瀝青混凝土配合設計之成效。

瀝青混凝土的品質管控也是延長養護工程預期使用壽命的關鍵，可以從提升平坦度、強化駐廠品質管理，以及鼓勵並培植優良施工廠商等方面著手。此方面牽涉到之措施，在平坦度部分包含將 IRI 納入驗收，鼓勵使用新型鋪裝機、在機關內部實施激勵措施…等，為優化駐廠品質管

理，則應提供適當監造及駐廠訓練、編撰工作手冊、落實稽核制度。而改採最有利標、成效式契約等採購方式的調整，則可能有助於機關找到最優質的施工廠商。

當鋪面的預計使用年期尚未屆滿時，有時會因為突發的狀況如暴雨或事故刮痕等，使鋪面上產生預期之外的損壞狀況，這時就會非常需要具有機動性的坑洞緊急填補措施。高公局目前採用的統一調度機制已是一種具有機動性的應變方式，但是，還可以再強化相關人員訓練，使修補動作更加熟練快速。使用防水臨時修補材料、移動式再生修補車、預鑄式瀝青磚等措施可以提提高緊急修補的效率和品質，除能夠迅速解決道路問題外，更可以避免小問題變成大問題，延長鋪面的整體使用壽命。

3、降低單次施工之碳排放量

降低施工之碳排放量，可從材料和施工兩方面著手。在混合料中加入再生材料和刨除料，不僅可以減少新材料的使用，還能降低生產過程中的碳排放，實現資源循環利用，在不影響鋪面應有之耐久性的前提下，可以使用部分再生材料、使用刨除料、生產過程降低碳排放(冷拌、溫拌)。在施工方面，優化施工過程中的各個環節，包括運輸和機具的能源使用，可以顯著減少碳排放。可採取的對策包含：降低運輸過程排碳、提高機具能源運用效率、推動鋪面工程相關之環境產品聲明(EPD)等，若將推動環境產品聲明(EPD)納入採購時之考量並搭配適當的決標原則，將能夠透明化碳足跡，促使營造廠發展更加環保減碳的施工方式。

4、充分納入決策考量

最後，必須透過建立完善的資料庫和估算工具，才能讓各機關從規劃和設計階段就充分考慮工程的整體碳足跡，進而選擇最合適的工法和材料。可以參考 PCCES 編碼資料庫及營建物價資料庫，將碳足跡當成工程的成本那樣來加以考量，建立全國皆可通用的參考資料庫，各機關也可在各自的鋪面管理系統中納入常用工法與材料碳足跡參考值。另外，配合專案層級設計工具，也可同步發展是合專案層級之 LCA 工具。

(三) 鋪面氣候變遷調適作為

表 3 則是針對鋪面氣候變遷調適作為列出可行的對策。為了提升鋪面的氣候變遷調適韌性，研究總結出 4 項重要目標，分別為：常態性維持路面完整性、材料韌性提升、災損與事故預防，以及災害後路面搶修，分別說明如下：

表 3 國道鋪面氣候變遷調適韌性提升之可能對策

目標	考慮項目	對策
完善養護規劃	整修計畫	鋪面管理系統(Right time & Right place)
	適當工法選擇	研訂整修維護工法選擇原則 發展專案層級設計工具，如：ME design 或 Pure Mechanical design (Right method)
材料韌性提升	對高溫及紫外線抗性	更精確的瀝青膠泥性能要求(如:軟化點, 黏滯度...) 瀝青混凝土添加廢輪胎橡膠
災損與事故預防	坑洞緊急填補效率	做好統一調度機制、強化人員訓練 使用防水臨時修補材料 移動式再生修補車、預鑄式瀝青磚
	雨天行車安全	定期抗滑檢測 反曲點全面盤點，加強排水或改為 PAC
	天坑防範	盲溝檢測、修復破損管道 善用非破壞性檢測找出軟弱路基或潛在天坑
災害後路面搶修	整備能量及訓練	儲備緊急搶修材料 規劃緊急鋪設道路標準作業程序

1、完善養護規劃

完善養護規劃包含整修計畫之訂定、選擇合適的整修工法以及進行嚴格的品質管控，亦即確保養護規劃符合 3R 原則(Right Time, Right Place, Right Method) 透過科學化、邏輯化的方式制定整修計畫，確保在合適的時間和地點進行維護，除可避免過度施工和資源浪費；更能夠使路面可常態性維持良好狀態，防止路面因連續下雨、連續高溫或低溫等狀況，造成連續性的大面積劣化，影響行車安全與品質。

2、材料韌性提升

面臨溫差變化加劇的挑戰，更需要提高瀝青混凝土對高溫及紫外線的抗性，亦即提升瀝青混凝土鋪面的材料韌性。此目標可藉由選用適當的瀝青膠泥來實現，例如試辦可行之材料或技術，如廢輪胎橡膠，雖然在我國尚未廣泛被使用，但在鋪面中添加該類高分子橡膠材料確實能夠提高路面的耐熱性和抗紫外線能力，從而減少高溫和紫外線對路面的損害，延長路面的使用壽命。此外，美國的瀝青膠泥分級制度是採用適用之溫度環境標示，與我國非常不同，我國的改質瀝青膠泥沒有使用 PG 分級，故目前無法精確掌握改質瀝青膠泥的性能和適用條件，若能引進美國之 PG 分級概念將能有顯著幫助。

3、災損與事故預防

暴雨頻率和強度的增加，可能為國道路面帶來災損並影響用路人行車安全。在對路面的影響部分，需要提高坑洞緊急填補效率和改善雨天行車安全。高速公路局目前實施的統一調度機制、強化人員訓練等措施應持續辦理，提高緊急修補的效率。使用具高度防水性的臨時修補材料，可防止坑洞緊急修補面反覆脫落損壞，避免小問題演變為大問題，延長路面的整體使用壽命。國內亦有採用移動式再生修補車和預鑄式瀝青磚等創新坑洞修補方式，亦可評估思考研發更多的創新修補方法。此外，定期抗滑檢測和採用反曲點加強排水或改為 PAC，可以提高雨天行車安全，減少事故發生。

路基流失可能造成天坑之類的大型災害，雖然迄今為止發生頻率不高，但卻影響巨大，故潛在天坑的問題也會是未來的一大挑戰。可以通過盡早進行盲溝檢測、修復破損管道，以及善用非破壞性檢測技術找到軟弱路基等方式來因應。這些措施能夠預防和及時發現路基問題，防止路面塌陷，保障用路人行車安全。

4、災害後路面搶修

此部分主要為災後搶修的整備能量及人員訓練，包含儲備緊急搶修材料，以及規劃緊急鋪設道路標準作業程序等。國道目前尚未因為鋪面因素發生大型災害問題，但隨著劇烈天氣的頻率增加，仍然有必要防患於未然。可以要能夠在災害發生後快速搶通、快速復原，需要充分的準備與完善的標準作業程序。

三、建議事項

(一) 在國道鋪面管理系統精進議題部分，建議如下：

1. 目前國道鋪面管理系統已經完成路段單元的劃分，可就區段單元及特性分區的切分方式加以探討，並強化鋪面管理系統之鋪面狀況及基本資料查詢展示功能。
2. 可就下列議題持續研究發展：鋪面損壞處理方式決策樹、績效曲線(PMS 模型)、老劣化曲線(ME 模型或 Pure M 模型)，以及可搭配自動化檢測車作業方式之綜合性指標，發展符合本土化之績效預測曲線並輔助專案層級鋪面結構設計，與國際接軌。之後將可分別發展為鋪面管理系統(路網層級決策工具)、鋪面結構與厚度設計工具、工程碳足跡計算(專案層級)工具等。
3. 建議持續提升配合設計及品管方法，強化駐廠品管及相關人員之專業能力，以確保施工成果符合設計預期為首要目標，未來可編撰配合設計審查及驗駐廠作業守則，做為相關人員訓練教材及基本素質要求之基礎。

(二) 在鋪面再生材料推廣及永續政策議題部分，建議如下：

1. 為減少過度施工和資源浪費，應持續發展完善的鋪面管理系統及專案層級設計工具(如力學-經驗模型)或純力學模型，以輔助選擇適當的鋪面整修結構設計。
2. 建議可持續改善瀝青混凝土配比成效，例如採取改良式馬歇爾配比設計，或在工程契約中要求更精確地要求瀝青膠泥特性；透過加強工程品質管控、選擇優質施工廠商，以及提升坑洞緊急填補措施，以延長每次養護整修的間隔並提高鋪面耐久度。
3. 為降低單次施工之碳排放量，可適當地在施工中加入再生材料和刨除料、優化施工過程、降低運輸排碳、提高機具能源效率，並推動環境產品聲明(EPD)以降低碳排放並促進環保施工方式的發展。

(三)在鋪面氣候變遷調適作為，建議可採取之措施如下：

1. 完善養護管理機制，制定詳細的整修計畫、選擇合適的整修工法與材料，並進行嚴格的品質管控，提高瀝青混凝土抗高溫及紫外線能力。
2. 持續落實統一調度機制、強化坑洞僅及修補人員訓練、使用防水臨時修補材料、移動式再生修補車或預鑄式瀝青磚等修補工法，增強坑洞緊急填補效率。
3. 定期進行抗滑檢測、針對易發生打滑事故位置，加強排水效率或調整鋪面種類增加抗滑能力，進而降低雨天時路面發生打滑事故之機率，改善雨天行車安全。
4. 應發展強化防範路基流失和探測潛在天坑之技術，例如：針對重點路段提高排水設施巡查頻率、落實破損管道之修復，並可搭配非破壞性檢測技術(如運用撓度儀或車載式透地雷達)找到軟弱路基或深層淘空位置等。

附錄一 參考資料清冊

- [1] Caltrans, California Manual on Uniform Traffic Control Devices, 2014 Revision 3 Charts (Effective March 10, 2023).
- [2] Florida's Highway Guide Signs,
<https://www.fdot.gov/traffic/trafficservices/signlibrary/guide/guide.shtm>
- [3] ASTM D6433-Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys
- [4] Metropolitan Transportation Commission, StreetSaver® User Guide - Draft 11072023.
- [5] Tom Pyle, Caltrans Pavement Program overview- 2024-5-8.
- [6] Kee Foo, RAP in Caltrans Presentation- 2024-5-9.
- [7] Caltrans-2024 sustainable-pavement-ideas-repository-04-2024.
- [8] Venkata L Mandapaka, Caltrans Pavement Management Systems, Office of Pavement Management, Pavement Program, Caltrans 2024-05-09
- [9] Bobby Dosanjh et al., Introduction to Programming Pavement- 2024-5-9.
- [10] Lauren Basuki, Caltrans Automatic Pavement Condition Survey, May 9 2024.
- [11] Raghubar Shrestha, Overview of California Flexible Pavement Design Approach (CalME), 2024-05-09
- [12] Caltrans, CalME Version 3.D002-manual, updated on 2/7/2023.
- [13] Florida Department of Transportation, Meeting with National Freeway Bureau of Taiwan, April 2024-4-9-24
- [14] FM 5-588 Florida Method of Test for Determining the Optimum Asphalt Binder Content of an Open-graded Friction Course Mixture Using the Pie Plate Method, August 31, 2020.
- [15] FDOT-Sustainability Issues, Meeting with National Freeway Bureau of Taiwan, May 23 2024.
- [16] FHWA, LCA Pave: A Tool to Assess Environmental Impacts of Pavement Material and Design Decisions – – User Manual, FHWA-HIF-22-032.
- [17] FHWA Climate Challenge & EDC-7 EPDs for Sustainable Project Delivery National Symposium, Presentation Slides.

附錄二 Caltrans, Sustainable Pavement Ideas Repository

(加州運輸部之永續鋪面創新知識庫)



Sustainable Pavement Ideas Repository



California Department of Transportation,
Division of Maintenance, Pavement Program



A Sustainable Pavement Initiative to Reduce
Emissions

Disclaimer: This document will not be copyright protected and we encourage all to use this booklet as a guide to reduce greenhouse gases.

This Repository is prepared by the California Department of Transportation, Division of Maintenance, Pavement Program. Any organization that would like to build on this document, or add to it, is welcome to do so.

We also want to recognize the work that San Mateo is doing to reduce greenhouse gas emissions. We took inspiration for our formatting from their own [Sustainability Ideas Book](#).

Thanks are given to the University of California, Davis, Pavement Research Center, and Nichols Consulting Engineers for their assistance and help in this document.



Table of Contents

Introduction	1
Factors that Affect Life Cycle Analysis Diagram	2
Pavement Structure Diagram	3
Magnitude Impact Pie Charts	4
Design	5
Long-Life Pavement Design	5
Concrete Overlay	7
Polyester Concrete Inlay	9
Life Cycle Cost Analysis (LCCA)	11
Life Cycle Assessment (LCA)	14
Construction Materials	16
Use of Supplementary Cementitious Materials (SCMs)	16
Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	18
Recycled Asphalt Shingles (RAS)	20
Recycled Aggregates	23
Recycled Plastics in Asphalt Pavements	25
Recycled Tires (Coming Soon)	27
Rubber Hot Mix Asphalt Gap Grade (RHMA-G) with 10 Percent RAP	28
Recycle Concrete Pavement	30
Low Carbon Cement	32
Construction	34
Smoothness	34
Environmental Product Declarations (EPDs)	37
Warm Mix Asphalt	40
Traffic	42
Reduce Fuel Usage (Coming Soon)	42
Maintenance And Preservation	43
Pavement Management System (PaveM)	43
End of Life And Recycling	45
Cold In-Place Recycling (CIR)	45
Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	48
Recycle Concrete Pavement	49
Recycled Aggregates	50
Contributors	51

Introduction

The California Department of Transportation's (Caltrans) Sustainability Pavement Ideas Repository aims to promote sustainability by sharing successful solutions for anyone. The purpose of this resource is to assist decision makers in tackling climate change and other sustainability-related issues- through pavement related activities. The aim is to facilitate the adoption of successful solutions, enabling them to act swiftly and efficiently.

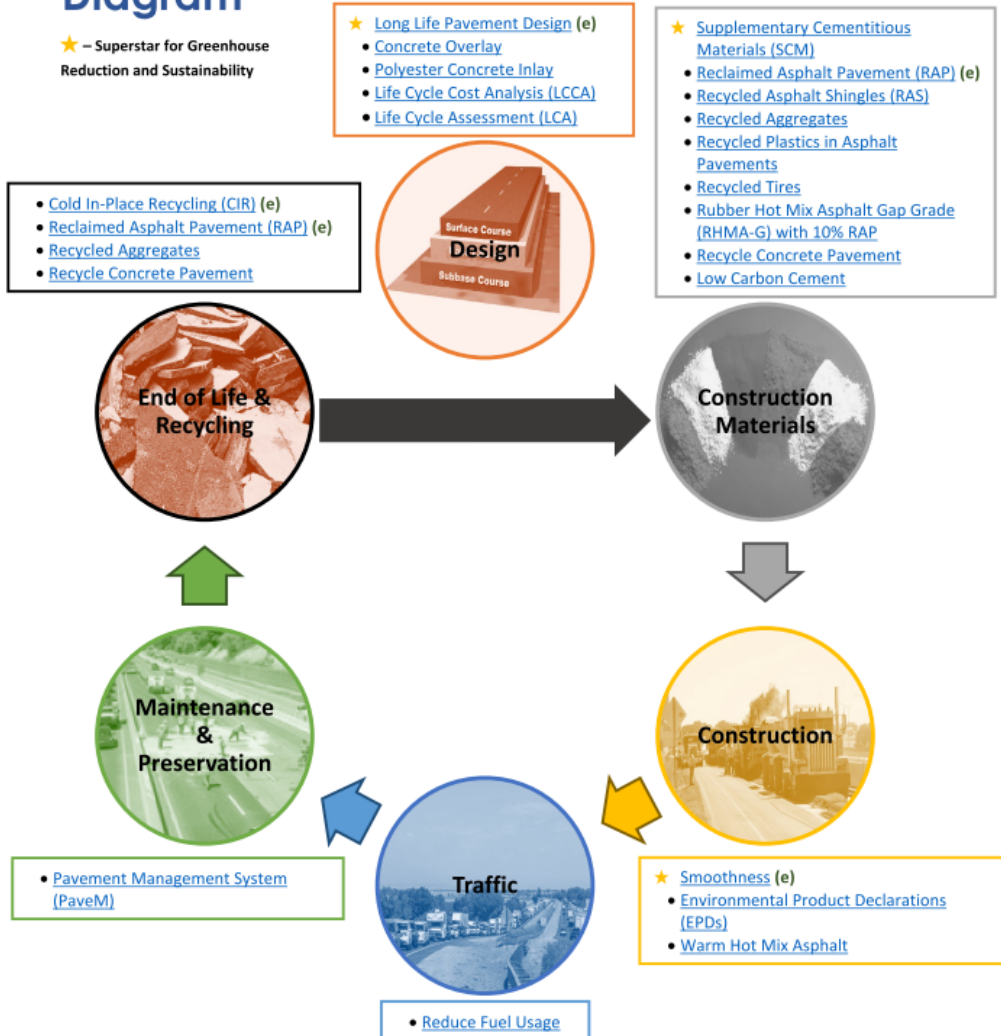
Sustainable pavements are designed to meet the needs of both present and future generations. Engineers take into account environmental, social, and economic factors when making decisions. Asphalt and concrete pavements should meet societal needs while using resources efficiently and preserving the ecosystem. To adopt sustainability best practices, it is essential to understand the pavement life cycle, including materials selection and production, design, construction, use, maintenance and preservation, and end-of-life and recycling.

This Sustainability Pavement Ideas Repository is a continuously evolving resource that reflects the progress and innovations of many bright and dedicated It details Caltrans' current and future actions to address pavement life cycle concerns.

[Click here](#) to learn who has contributed to the Sustainability Pavement Ideas Repository.

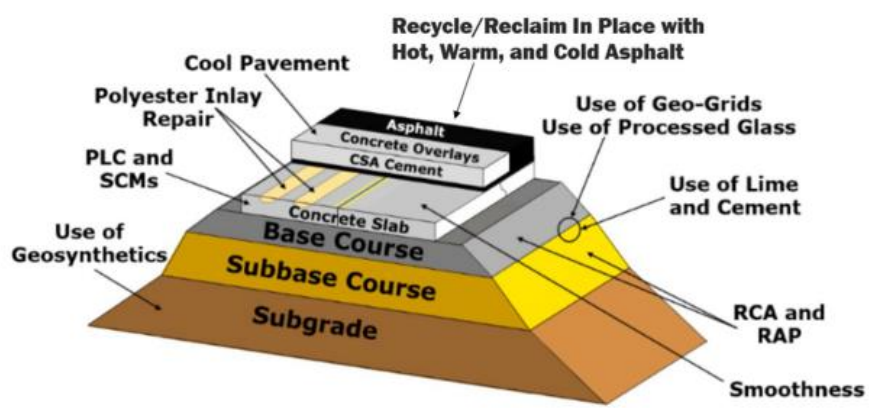
Factors that Affect Life Cycle Analysis Diagram

★ – Superstar for Greenhouse Reduction and Sustainability



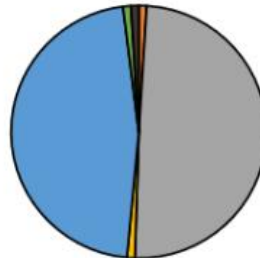
(e) – SB1 Efficiency

Pavement Structure Diagram

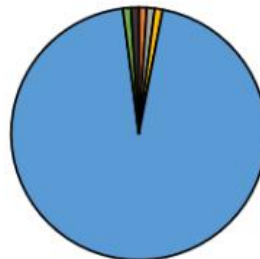


Magnitude Impact Pie Charts

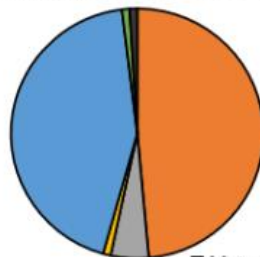
Sustainability Impact



Greenhouse Reduction Impact



Societal Impact* (Over 60 Years)



- Design Topic
- Construction Topic
- Maintenance & Preservation Topic
- Materials Topic
- Traffic Topic
- End of Life & Recycling Topic

*Societal Impact: the effect on people and communities by pavement. Example – Short Design Life Strategies require constant lane closure and repair.

Design

Long-Life Pavement Design



The Impact

It is believed that the longest-lasting pavement is the most sustainable pavement. Long-life pavement design can be accomplished as a policy objective for high volume roadways in which the target pavement design life ranges from 40 to 60 years. Long-life design can be considered for both asphalt and concrete pavements, and it can be utilized in new, rehabilitation, and reconstruction pavement projects.

The use of long-life pavement can be regarded as an opportunity for reducing life-cycle costs, environmental burdens, and social impacts as compared to a standard, 20-year pavement design. In other words, a long-life pavement design can significantly impact materials usage, improve pavement condition (thus, improving user delays and fuel efficiency), and eliminate maintenance and construction activities over the pavement lifespan.

Description

Highway pavements were historically designed and constructed to provide 20 years of service life. The use of long-life pavement design with 40 to 60 years of design life has shown promising potential to minimize maintenance and



rehabilitation costs and reduce public user delays due to road closures, particularly on high-volume roads, and will produce savings for many years after construction. In addition, shorter and fewer road closures reduce risks to both public and construction workers.

Long-life pavement can be achieved by increasing the pavement structural thickness and/or by increasing the material stiffness and durability, along with quality materials/mixture production and construction. As such, long-life design results in an initial cost and possibly initial environmental impact increases, but the overall life-cycle costs and environmental impacts over the life cycle are expected to be less.

Where It's Been Implemented

While Caltrans has been investigating the design and construction of longer-life pavements for several years, the Caltrans Highway Design Manual was revised in 2021 to mandate longer-life pavement for virtually all new pavement construction and rehabilitation projects. An Interstate 5 rehabilitation project in Sacramento is benefitting from advances in pavement design and innovative materials. Caltrans, in collaboration with the University of California Pavement Research Center (UCPRC), utilized the long-life design approach for the [FixSac-5](#) project in which a new road surface with a 60-year pavement life and \$37 million in savings over its anticipated lifespan is projected.

Key Factors for Success

Long-life pavement design requires a profound understanding of design and construction factors that affect both short-term and long-term pavement performance. Long-life pavement can be achieved through robust pavement design, use of durable materials, ensured quality during production and construction, and timely maintenance. The design requires typically about 10% thicker pavement and thus 10% additional cost for the pavement. The direct cost savings are produced by the lessening of preservation or rehabilitation over the longer life of the pavement.

Key Obstacles

- Understanding how to design for a longer life
- A good Life Cycle Cost Analysis
- A good Environmental Life Cycle Analysis

References and Resources

100 Year Pavement Design Guidelines

Concrete Overlay

Eliminate the removal of existing pavement and reduce the use of new materials, thus preserving the environment.



The Impact

Concrete overlays are a more sustainable alternative than concrete inlays in terms of life-cycle cost and environmental impact since the latter alternative requires remove and replace. The need for structural rehabilitation of existing pavements is much higher than the need for new construction. The use of overlays can have a significant impact on the Caltrans network.

Description

Concrete overlays are the construction of a concrete pavement Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) or Continuously Reinforced Concrete Pavements (CRCP) on top of the existing pavement, which can be concrete or asphalt. Since they are placed on top of existing pavements, they take advantage of the structural contribution of the existing pavement while reducing or even eliminating disposal of existing materials. In addition, we also save on the placement of new materials since we do not need a new base.



Where It's Been Implemented

In 2021, Caltrans partnered with FHWA on their Targeted Overlay Pavement Solutions (TOPS) initiative under their Every-Day Counts (EDC) program to promote the use of overlays for their cost-savings and sustainability benefits. Caltrans has been using concrete overlays as a strategy since the 1980s when some sections were built on I-80. In the last five years, Concrete Overlays over Asphalt (COA) were used on SR-113 in District 3 and SR-247 in District 8, which are secondary routes where the truck traffic volume is much lower, so the concrete structural section can be thinner and therefore the concrete panels must be short. This type of pavement is called Short Jointed Plain Concrete Pavement (SJPCP). Caltrans has also built CRCP on top of existing JPCP, which is known as a Concrete Overlay over Concrete (COC). With FHWA assistance through TOPS, we will be providing training on concrete overlays.

Key Factors for Success

Training is a key factor for the success because concrete overlay must be a tool in the toolboxes of Caltrans designers. As a result, Caltrans designers need to learn about their benefits, performance, limitations, and changes required on our current specifications and plans when selecting concrete overlay as a strategy. Existing cost and environmental analysis tools must be used in conjunction with engineering judgment to decide on the use of concrete overlays.

Key Obstacles

The lack of knowledge can be overcome with training. Concrete overlays require tapering to the grade of an existing undercrossing or overcrossing, this can be evaluated during the project selection phase of the technical team. It must be emphasized that concrete overlays cannot be used everywhere due to their effect on changing the grade and limiting clearance.

References and Resources

Feldman, Dulce Rufino; Mateos, Angel; Stuart, Charles; Yost, Deborah; Garcia, Reimond, Harline, Joe and Workinch, Addisu, 2022. "Caltrans Concrete Overlays," Final Report to FHWA EDC-6 on Target Overlay Pavement Solutions (TOPS), California Department of Transportation.

Fick, Gary; Gross, Jerod; Snyder, Mark B.; Harrington, Dale; Roesler, Jeffery, and Cackler, Tom, 2021. "Guide to Concrete Overlays," Fourth Edition, National Concrete Pavement Technology Center.

Polyester Concrete Inlay

Mitigate chain wear damage on concrete pavements



The Impact

Caltrans continues to battle tire chain wear damage on corridors subjected to high truck volumes and heavy snowfall, as is common in the Sierra Mountain passes on the I-80 corridor. Truck chain wear often causes rapid pavement deterioration with severe ruts on concrete pavements along the wheel path, which impairs driver safety and calls frequent lane closures for repair work.

Description

For polyester polymer concrete (PPC) inlay, grind out the damaged concrete pavement surface along the wheel paths with a width of three feet and a depth of 1–1.5 inches. PPC, a mixture of polyester binder and dry aggregate, is then placed on the ground wheel path. The service life of PPC inlay is expected to be about five years and varies depending on the intensities of snowfall and corresponding chain controls over the winter seasons. When PPC inlay reaches the end of its service life, it can be replaced with new inlay without compromising the structural condition of the existing pavement. Contrary to other available alternatives, such as full-width grinding and overlay or full-depth replacement,



PPC inlay could be a more cost-effective and sustainable strategy for mitigating chain wear damage.

Where It's Been Implemented

Since 2017, Caltrans has placed PPC inlays to mitigate truck chain wear damage on I-80 (mountain areas). With over five years of field performance evaluation, PPC inlay along the wheel paths can be used as an effective measure for mitigating truck chain wear damage.

Key Factors for Success

Educate field engineers and inspectors on materials handling and quality assurance in constructing PPC inlay. Use of quality material is also critical for achieving desired performance of PPC inlay.

Key Obstacles

In general, the regional maintenance and construction engineers are satisfied with PPC inlays. There's a concern about the potential need for frequent replacement of the inlays. It would be necessary to conduct a close review of the cost effectiveness of PPC inlays and compare that with other available alternatives.

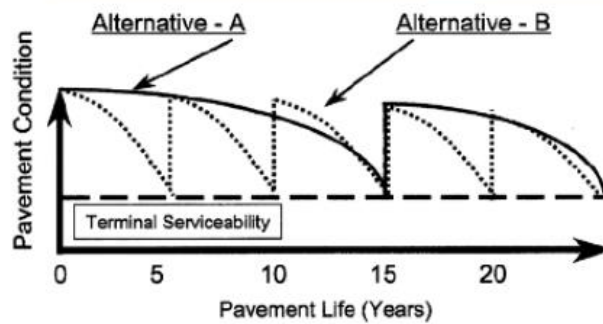
References and Resources

J. Medina, et al., *Performance Evaluation of Polyester Polymer Concrete (PPC) Inlays on I-80 Nev near Truckee*, Final Report prepared for Caltrans, NCE, November 2022.



Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

Analyzes the long-term cost effectiveness of alternative designs for new and existing pavements.



(FHWA, 2002)

The Impact

Caltrans fully considers life-cycle cost impacts when making project-level decisions for pavements. Aside from the Agency cost, the user cost of the public



traveling on a highway undergoing construction also has a direct impact on the environment. User costs arise when work zones restrict the normal flow of the facility and increase the travel time of the user by generating queues or speed changes through the work zones. User costs are given serious consideration and can become a significant factor when a large queue occurs for a given alternative, thus increasing the potential for GHG.

Description

LCCA provides decision-makers with the ability to determine the least-cost solution for a transportation investment requirement and is therefore a natural fit within the Asset Management framework. It assists in ensuring that pavement alternatives are analyzed objectively and consistently statewide, regardless of who engineers, builds, or funds the project. It evaluates all major investment decisions to increase the effectiveness of those decisions. The goal is to achieve and sustain a desired state of good repair over the life cycle of the pavement asset at the minimum practicable cost.

Where It's Been Implemented

The first version that was used by Caltrans was RealCost 2.2CA starting in 2007. On July 6, 2012, President Barack Obama signed into law P.L. 112-141, the Moving Ahead for Progress in the 21st Century Act (MAP-21). MAP-21 provides transportation funds and transforms the framework for investments to guide the growth and development of the country's vital transportation infrastructure. It ensures that investments in federal-aid funds are directed to support progress toward achieving performance targets established in an asset management plan. In 2013, Caltrans developed a newer version of RealCost Version 2.5CA, which is a modified version of FHWA RealCost Version 2.5 and includes many improved features.

Key Factors for Success

The study of costs over a long period of time, gives useful insight into which pavement alternative is the most cost-effective. The result of LCCA is a comparison of pavement alternatives. Engineers should be mindful of the "garbage in, garbage out" mentality. How well RealCost models a project is determined by how well the engineer can match the project conditions with the program's data input.

Key Obstacles

LCCA is not a means to predict the future, its calculations are based on today's prices and historical average costs for similar projects. Market factors and other



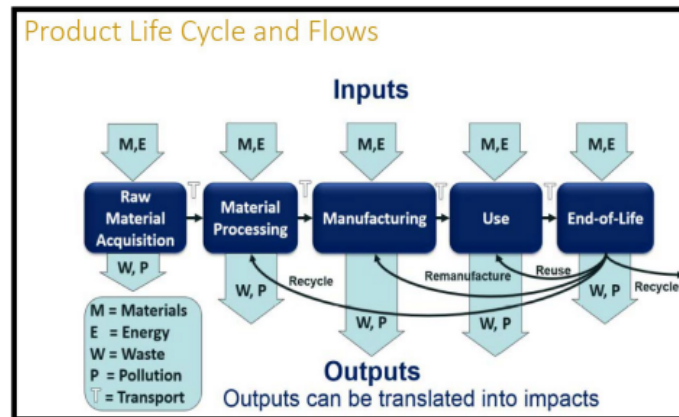
events could have a dramatic impact on the actual long-term costs, but not in the comparison. The results of the analysis don't reveal any information about the merits or benefits of a single project, just how the long-term costs of one pavement alternative compare to another. Sound engineering judgment is required when comparing results.

References and Resources

Life-Cycle Cost Analysis Primer", U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Asset Management, August 2002.

Life Cycle Assessment (LCA)

Analyze long-term environmental impact of pavement practices.



The Impact

Pavement life cycle assessment (LCA) tool eLCAP could be used to capture all pavement activities and evaluate the complete GHG emission or environmental impacts of pavement practices to determine which pavement practices save GHG emissions during a specified time (long-term or design life). Reducing GHG emissions is necessary to achieve Caltrans' Lead Climate Action goal. All activities associated with pavement construction, preservation, and use phases produce GHG. Some pavement practices could be associated with less GHG emission but may need repeated pavement preservation activities during a specified duration, while others could be associated with more GHG emission but may need less repetitive pavement preservation.

Description

LCA tool eLCAP provides designers and decision-makers the ability to determine green pavement and environmentally sustainable pavement practices. eLCAP utilizes California's based Life Cycle Inventory (LCI) that can quantify its GHG emissions and other environmental impacts of pavement operations. It considers GHG and other impacts in pavement management, conceptual design, design, materials selection, and construction project delivery decisions. Using eLCAP,



Caltrans will be able to evaluate the life cycle environmental impacts as part of policy and standards development.

Where It's Been Implemented

Caltrans has developed pavement life cycle assessment (LCA) tool eLCAP and is ready to be implemented. Training has been given to employees in Headquarters and all 12 Districts.

Caltrans is using a spreadsheet based LCA tool from the Federal Highway Administration (FHWA) called the Infrastructure Carbon Estimator (ICE). This can obtain an estimate for GHG production at an earlier stage in project development than what environmental Life Cycle Assessment for Pavements (eLCAP) operates for planning and early conceptual project evaluation. ICE functions at the corridor or higher level with very little input by the user.

Key Factors for Success

Need to develop pavement environmentally sustainable policy or guidelines for pavement practice. The existing LCI needs to be updated with current data, including replacing proprietary data, so eLCAP could be given access to the public. As improvement of equipment and construction practices are continuous, LCI needs to get continuous updating. In addition, existing eLCAP needs to include environmental impacts from lane closures and pavement structural responses. Implementation of eLCAP, with life cycle cost analysis (LCCA) on project decision making, will promote sustainable pavement practice.

Key Obstacles

Caltrans is focused on materials and the construction phase for saving GHG emissions and encourages to use recycled materials in pavements. There is no policy on long-term sustainable pavement practice and use of LCA to include the user phase to determine GHG emissions. Designers and decision-makers need to know the results of the current decisions made to then be able to make future decisions.

References and Resources

eLCAP: A Web Application for Environmental Life Cycle Assessment for Pavements", UCPRC

Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document", U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Preconstruction, Construction and Pavements.

Construction Materials

Use of Supplementary Cementitious Materials (SCMs)

Make concrete more sustainable and durable.



The Impact

Traditional supplementary cementitious materials (SCMs) like fly ash and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) are widely used in Caltrans projects for their sustainability and durability. However, supply is limited, and demand for SCMs to reduce GHG emissions increases. The concrete industry is now prioritizing finding new sources of SCMs to meet these demands.

Description

The most common SCMs in California is fly ash, a waste product of coal combustion in electric power plants, and GGBFS, a co-product of the production of iron-based alloys. These resources are diminishing and they are mostly imported from other states or other countries. Research projects are exploring alternative pozzolanic materials like agricultural and forest biomass, natural



pozzolans, cellulose nanomaterials, harvested fly ash, and waste glass to improve concrete sustainability and durability. The researchers are also looking into any other alternative sources that could contribute to steady supply of high-quality SCMs for use on Caltrans projects.

Where It's Been Implemented

Traditional SCMs currently accepted in the standard specifications include AASHTO M295 Class F fly ash, Class N natural pozzolans and metakaolin, AASHTO M302 Grade 100 or 120 GGBFS, and AASHTO M307 silica fume. Caltrans is currently conducting research projects to explore alternative sources of SCMs and the feasibility of using them to replace traditional SCMs in concrete production without losing the benefits in reducing GHG emissions and improving concrete durability.

Key Factors for Success

It is critical to obtain continued support and collaboration from stakeholders, including Caltrans functional units and industry. It is also critical to maintain a steady supply of material while keeping the consistency of product quality.

Key Obstacles

It will be necessary to secure steady, commercial level production of alternative SCMs. There may be resistance to the initial cost for developing production plant.

References and Resources

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Reduce pavement waste and use of new material by using existing asphalt binder and aggregates in RAP.



The Impact

The most common recycled material used in HMA mixtures is Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). The advantages of using RAP are:

- Reuses paving oil and reduces Greenhouse Gas (GHG) generation in the production of paving oil
- Recycles aggregates which are especially important as aggregate supplies are becoming stretched.
- Reduces GHG generation for mining, processing, and trucking aggregate

Description

The High RAP Non-Standard Special Provision (nSSP) allows increasing the maximum allowable RAP percentage in HMA from 25 to 40 percent. Since the traditional Superpave mix design cannot completely account for the increase in RAP content, other mix design tools are being evaluated in this nSSP:

- A new binder test (Delta T_c) has been added to determine the behavior of the virgin binder and extracted binder from the High RAP.



- Contractors are allowed to use a performance-graded asphalt binder grade with upper and lower temperature classifications reduced up to 12°C from the specified grade (2 grades softer binder) and recycling agents.
- Additional tests needed to be performed during mix design and production. A few tests were required by the nSSP, and a few of them were for research purposes, such as IDEAL CT, I-FIT, Repeated Load Triaxial Test, and Bending Beam Fatigue.
- The mix design method has been improved by using Balance Mix Design (BMD) concepts to adjust the binder content and meet the nSSP criteria.

Where It's Been Implemented

Caltrans standard specifications (2018) allow up to 25 percent RAP in HMA mix by aggregate weight. Caltrans is evaluating 40 percent RAP (binder replacement) pilot projects to increase Caltrans RAP usage.

Key Factors for Success

Data collection and analysis are critical for the improvement of the nSSP. The improved nSSP should allow the Contractor to design and produce a good-performing HMA with up to 40 percent RAP.

Key Obstacles

HMA mix containing High RAP could be stiff, brittle, and susceptible to raveling and early cracking due to heavily aged binder in RAP. Agencies should consider Contractor's need to use new tools, such as a softer virgin binder and/or rejuvenator, to soften these high RAP mixes. Conversely, Caltrans also need to have a test that can accurately evaluate the early cracking potential of these high RAP mixes.

References and Resources

[CalRecycle: Asphalt Pavement Recycling](https://calrecycle.ca.gov/condemo/) <https://calrecycle.ca.gov/condemo/>

Recycled Asphalt Shingles (RAS)

Reduce pavement waste and use of new material by using existing asphalt binder and fines in RAS.



From Roofs to the Roads

The Impact

Using Recycled Asphalt Shingles (RAS) in Hot Mix Asphalt (HMA) creates a cycle of reusing materials that optimizes the use of natural resources. While several factors influence the use of RAS in asphalt pavements, the two primary factors are economic savings and environmental benefits. RAS could be a useful alternative to virgin materials because it reduces the use of virgin aggregate and/or virgin asphalt binder required in the production of HMA.

Using RAS in HMA may conserve energy, lowers transportation costs required to obtain quality virgin materials, and preserves resources. Additionally, it decreases the amount of construction debris placed into landfills and does not deplete nonrenewable natural resources such as virgin aggregate and asphalt binder. Ultimately, recycling asphalt creates a cycle that optimizes the use of natural resources and sustains the asphalt pavement industry.

Description

The HMA-RAS nSSP allows the use of RAS in HMA for a maximum of three percent RAS by weight of total aggregate and a maximum of 15 percent by Binder Replacement (BR). New performance tests have been added to the Caltrans Standard Specifications to ensure the quality of the HMA-RAS mix during mix design and production, as listed below:



- A new binder test (Delta T_c) has been added to determine the behavior of the virgin binder and extracted binder from the HMA-RAS.
- Contractors are allowed to use a performance-graded asphalt binder grade with upper and lower temperature classifications reduced up to 12°C from the specified grade (2 grades softer binder) and recycling agents.
- Additional tests needed to be performed during mix design and production. A few tests were required by the non-Standard Special Provision (nSSP), and a few of them were for research purposes, such as IDEAL CT, I-FIT, Repeated Load Triaxial Test, and Bending Beam Fatigue.
- The mix design method has been improved by using Balance Mix Design (BMD) concepts to be able to adjust the binder content and meet the nSSP criteria.

Where It's Been Implemented

A nSSP has been developed for using RAS in HMA. A RAS pilot project in HMA was built on State Route 49 in El Dorado County (EA 03-2G1004) in November 2021. Four mixes were included in short test sections: (1) a control mix with no RAS or recycled asphalt pavement (RAP), (2) a typically used mix with 10 percent RAP that was also used for construction of the rest of the overall project, (3) a mix with three percent RAS, and (4) a mix with 10 percent RAP and three percent RAS.

A technical report has been drafted on the project performance and test results by the University of California Pavement Research Center (UCPRC) for Caltrans. This pilot project will be monitored to find and address any possible issues in the future. Also, data collection and analysis will be performed to adjust the nSSP and test methods as needed. The working group is working to find more pilot projects for nSSP improvement and data evaluation and analysis purposes.

Key Factors for Success

Data collection and analysis are critical for improvements to the nSSP. Pilot project monitoring helps to ensure the short-term and long-term performances of the HMA-RAS. Life Cycle Cost Analysis (LCCA) for HMA-RAS will also provide very useful information regarding the feasibility of using recycled shingles in HMA.

Key Obstacles

As asphalt ages and is exposed to heat and sunlight, it loses flexibility and the ability to melt and becomes flowable. RAS binders are very stiff as the roofing shingles have been exposed to extreme temperatures for perhaps decades. HMA mixtures containing RAS may be prone to cracking, aging, and raveling, which will reduce their service life. Shingles may contain 25 to 35 percent "extremely aged" asphalt binder. However, binder mobilization from RAS to HMA



could be varied depending on the temperature, silo time, use of recycling agents, and types of shingles (post-consumer or manufacturer waste). Assuming complete RAS mobilization of the binder will lead to inaccurate (lower) Optimum Binder Content and poor mix performance. As a result, the mix properties need to be changed to properly account for the RAS.

References and Resources

[CalRecycle: Asphalt Roofing Shingles Recycling](#)

Recycled Aggregates

Use recycled aggregates replacing virgin aggregates to manufacture pavement materials.



The Impact

California is facing depletion of virgin aggregates, and consequently, costs are increasing. Often, industry has difficulties getting virgin aggregates for the construction of pavements and other structures. Virgin aggregates are mined, processed, and transported for use in pavements and have a direct impact on the environment. Each activity before the virgin aggregates is delivered produces greenhouse gases (GHG). The use of recycled aggregates will reduce the use of virgin aggregates and consequently save GHG emissions and conserve natural resources.

Description

Recycled aggregates are manufactured by processing old asphalt, concrete, lean concrete base, and cement treated base. The recycled aggregates could be used alone or combined with virgin aggregates but need to be clean and comply to the material requirements as specified. Recycled aggregates do not require mining and long hauling and will produce relatively less GHG.

Where It's Been Implemented

Caltrans has developed standard specifications and included use of recycled aggregates in bound and unbound bases, and in minor concrete. Almost all



pavement bases and subbase are built with recycled aggregates throughout California, including city and county roads.

Key Factors for Success

Promote use of recycled concrete aggregates (RCA) to manufacture concrete for individual slab replacement and bottom lift of two-lift concrete pavement. Develop guidelines for using high RAP in asphalt pavements and RCA in concrete pavements, including incentives for using recycled aggregates.

Key Obstacles

Caltrans does not have design guidelines to use high RAP in asphalt pavement and use of RCA in concrete pavements. Use of RCA in two-lift concrete pavement is promising but construction is relatively expensive.

References and Resources

Sections 23 through 30, 90-2, Caltrans Standard Specifications.

Recycled Plastics in Asphalt Pavements

Reduce plastic waste, and greenhouse gas emissions, conserve asphalt binder, improve service life and sustainability



The Impact

Plastic waste poses a significant global issue, with no end in sight despite efforts to reduce and recycle plastics. We must make more efforts to prevent waste plastic from ending up in landfills. Utilizing waste plastic in asphalt roads is one of these efforts.

Description

Two processes can achieve the addition of waste plastic; in the first process, the waste plastic is converted to pellets after a thorough cleaning and is added to the binder like an asphalt polymer modifier up to 10 percent by binder weight. Such a process can be called a wet process. Preliminary lab tests on the modified binder indicate that the waste plastic acts as a stiffening agent by increasing the stiffness of the binder. The over binder property modification is a function of the type of waste plastic (LDPE, HDPE, PET, PVC, PP, PS, etc.).

In the second process, cleaned waste plastic is introduced into the hot plant with heated aggregate, where the waste plastic melts and coats the aggregate facilitating stronger bonding of asphalt over aggregate, improving the over properties of the resulting mix. Some plastic polymers may improve both deformation and cracking resistance of base binders. Caltrans is evaluating



through extensive literature reviews and comprehensive laboratory testing, as this can meet Caltrans' goals of sustainability and environmental stewardship.

Where It's Been Implemented

Since 2020, Caltrans has been evaluating various technologies to incorporate waste plastics into our highways after carefully researching the processes and technologies. Caltrans successfully placed a pilot project that established the proof of concept, but the first pilot did not work well due to adverse environmental conditions and material issues. Another pilot project paved last year has been successful. The pilot section is performing quite well after being exposed to the recent flurry of storms.

Key Factors for Success

Careful vetting and evaluation of various waste plastic additive products and the HMA incorporation technologies through comprehensive laboratory testing and comparative performance analysis, along with LCCA implication, are keys to success.

Key Obstacles

Lack of literature, research studies, and long-term field performance data, limited literature about the usage methodologies, etc., are some of the challenges.

References and Resources

[National Asphalt Pavement Association: Plastics in Asphalt](#)



Recycled Tires (Coming Soon)

The Impact

Description

Where It's Been Implemented

Key Factors for Success

Key Obstacles

References and Resources



Rubber Hot Mix Asphalt Gap Grade (RHMA-G) with 10 Percent RAP

Reduce tires in landfill by incorporating into asphalt pavements.



The Impact

The default surface mix in Caltrans is RHMA-G mix, and Caltrans placed approximately 3.5 million tons of RHMA-G in 2020. The ability to include RAP in RHMA-G represents a great opportunity for Caltrans to increase RAP usage. Allowing 10 percent RAP in RHMA-G will potentially enable Caltrans to consume an additional 0.35 million tons of RAP each year.

Description

The 10 percent RAP in RHMA-G nSSP allows the use of 10 percent RAP by weight of aggregate blend in RHMA-G mixes. The minimum asphalt rubber binder content remained unchanged at 7.5 percent. Pilot projects have three percent and four percent air voids to accommodate the additional RAP binder in the RHMA-G mix.



Where It's Been Implemented

In 2022, Caltrans through the Pavement and Materials Partnering Committee (PMPC), drafted the 10 percent RAP in RHMA-G nSSP, and several pilot projects are being built for evaluation. If the pilot projects have equal or better performance, the 10 percent RAP in RHMA-G specification will be designated as standard specifications allowing it to be used statewide.

Key Factors for Success

10 percent RAP in RHMA-G has equal or better performance when compared to RHMA-G.

Key Obstacles

Neglect or fail to invest in the design of a good 10 percent RHMA-G mix. The asphalt plant is not willing to adjust to produce a consistent and good 10 percent RHMA-G mix.

References and Resources

[Caltrans Crumb Rubber Usage News Article](#)

Recycle Concrete Pavement

In-place recycling deteriorating concrete pavement and use in base.



The Impact

Caltrans has many concrete pavement sections over 40 years old, exceeding design life and need frequent maintenance and lane closure, as the pavement condition is deteriorating rapidly. In some cases, it requires major rehabilitation or reconstruction. Current practice of concrete pavement rehabilitation or reconstruction is to remove and replace with a new concrete pavement. This removed concrete is often transported for reprocessing or dumped at a landfill. The in-place recycling of old concrete pavements and use in base could reduce waste, trucking, and conserve natural resources.

Description

The recycling or rubblization of existing deteriorating concrete pavements is performed with aggressive techniques to reduce concrete slabs to aggregates typically to less than 12 inches to eliminate slab action of the concrete pavements. This rubblized concrete pavements is used as a base for asphalt



concrete or concrete overlay. The deteriorating concrete pavement is completely utilized in the pavement structural section reducing or eliminating the requirement of virgin aggregates and hauling distance.

Where it's been implemented

Caltrans has not implemented in-place recycling or rubblization of deteriorating concrete pavement and used it as a base. Other DOTs e.g., Illinois, Michigan, and Wisconsin have practiced rubblization of concrete pavement and used in base. California has historically only used a crack seal and overlay strategy, however this rubblization strategy is most effective if there is D-Cracking or Alkali Silica Reactivity present.

Key Factors for Success

Develop design and construction guidelines for in-place recycling or rubblization of existing deteriorating concrete pavements and overlaying with asphalt or concrete pavements. Include in Caltrans pavement design tools or design table and train District design engineers and material engineers to use concrete pavement rubblization techniques.

Key Obstacles

Caltrans does not have design guidelines to use in-place recycling or rubblization of concrete pavements and overlay with asphalt or concrete. The concrete pavement rubblization is a new practice for Caltrans and requires encouragement through training, incentives, and/or piloting.

References and Resources

Rehabilitation of concrete pavements utilizing rubblization and crack and seal methods", Iowa State University.

Guidance, Parameters, and Recommendations for Rubblized Pavements", Wisconsin Highway Research Program

Rubblizing Portland Cement Concrete Pavement", Michigan Department of Transportation.

Low Carbon Cement

Reduce GHG emissions in cement and concrete production.



The Impact

Production of Portland cement generates a significant amount of GHG emissions, mainly in the process of making cement clinkers. Use of low carbon cement, such as Portland Limestone Cement (PLC) and other types of blended cement, reduces GHG emissions in cement manufacturing by using less amount of cement clinkers in the cement manufacturing process.

Description

American Society for Testing and Materials (ASTM) C150/ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) M85 permits ordinary Portland cement (OPC) to contain up to five percent of limestone inter-ground with clinker at finish grinding, while ASTM C595/AASHTO M240 allows Type II blended cement, aka PLC, to contain up to 15 percent of inter-ground limestone. PLC is known to help reducing GHG emissions in cement and concrete production by up to 10 percent as it uses less amounts of clinker, the production of which accounts for more than 90 percent of the CO₂ emissions in cement



manufacturing. After three years of laboratory investigation on the properties of PLC and its concrete mixtures with California specific materials, Caltrans decided to allow the use of PLC in Caltrans concrete projects in the same way of using OPC.

Where it's been implemented

Caltrans revised the Standard Specifications in 2021 to allow the use of PLC (Type II) and ternary blended cement (Type IT) in addition to the existing list of allowable blended cement such as Portland blast-furnace slag cement (Type IS) and Portland pozzolan cement (Type IP) for concrete production in Caltrans projects. Moderate sulfate resistance (MS) or higher is required in all types of blended cement, and they can be used in the same way of using conventional Portland Type II/V cement.

Key Factors for Success

It is recommended to conduct short- and long-term field performance evaluation for concrete pavements and structures built with PLC. It is critical to obtain coordinated collaboration and support from all stakeholders including districts and industry.

Key Obstacles

There is potential resistance to adopt the new practice of using PLC over traditional OPC, partly because of a misconception on the performance of PLC concrete. It would be necessary to provide engineers and practitioners with proper education on the properties and performance of PLC concrete.

References and Resources

J. Weiss, et al., *Impact of the use of Portland-Limestone Cement on Concrete Performance as Plain or Reinforced Material*, Final Report prepared for Caltrans, Oregon State University, June 2021.

Construction

Smoothness

Smother pavements improve driver safety, fuel efficiency, ride quality, vehicle wear and tear, and pavement durability.



The Impact

Smoothness is perhaps the top three single largest most impactful attributes to make a pavement sustainable. First, A smooth pavement will stop vehicles from bouncing down the road will naturally reduce the impacts to the pavement and cause less stress and thus a longer life. Second, and perhaps more important, a smooth pavement will require less energy for vehicles to travel over them. Smooth pavement can reduce the GHG emissions of every vehicle to travel over them by 3-10 percent.

Smoothness is a measure of the level of comfort experienced by the traveling public while riding over a pavement surface. Ride quality is crucial for the traveling public, with smoothness being a key performance indicator in pavement maintenance and rehabilitation. This reduces fuel and vehicle costs, extends service life, and enhances motorist safety and satisfaction.

The fuel efficiency of vehicles on our roads improves with a smoother pavement. Due to more "bumps in the road," more energy is required to move a vehicle over a rough surface than a smooth one. This extra energy, of using additional fuel, results in extra GHG into our environment. In addition, smooth pavements last longer than rough pavements (smoothness is a key design factor).



Description

All projects will be managed by tenth-mile segments, and the smoothness data will be collected using Inertial Profilers (IP). IP will provide a simulation of the longitudinal lane profile, including International Roughness Index (IRI) and Mean Roughness Index (MRI). Smoothness in Asphalt Pavement is managed by the HMA thickness and the initial existing pavement roughness. Thicker pavements and paving in more lifts will provide better opportunities for the contractors for smoothness. Also, pre-paving corrections or leveling courses can increase the chance for smoother pavement. Caltrans will pay in full for smoothness that is very near the specification and pay a bonus for extra smooth pavement. Conversely, Caltrans will charge a disincentive for pavement that is rough. Extremely rough pavement will be corrected or removed and replaced.

The concrete pavement smoothness specification is in Section 40-1.01D(8)(c)(iii). Pavement smoothness acceptance and verification is based on results of the inertial profiler testing. A specific Target Smoothness Table is provided, depending on the project type (new alignment, widening, lane replacement) and the pavement type (CRCP or JPCP). Based on the mean IRI (or MRI), Contractors can either receive pay adjustments, be required to perform corrective action, or do nothing. There is no additional payment for corrective action.

Where it's been implemented

In 2018, Caltrans introduced a new mandated nSSP for smoothness using Inertial Profiler (IP) for paving projects. Since then, the nSSP has been used on thousands of lane miles in California's state highway system. Over time, modifications and improvements have been made based on smoothness data analysis from hundreds of projects. The HMA smoothness nSSP has become standard and published in the 2022 Caltrans Standard Specifications.

In February of 2019, the Caltrans Pavement Program, under the Division of Maintenance, implemented a non-standard special provision (nSSP) for concrete pavement smoothness using incentives and disincentives using the international roughness index (IRI). After a few years of using the nSSP on constructed projects, input from industry, contractors, and Districts, this new concrete pavement smoothness specification was included into Section 40 (Concrete Pavement) of the 2018 Revised Standard Specifications in April 2022.

Key Factors for Success

New technologies and equipment on the inertial profilers can provide better data in terms of smoothness. It is also important to educate engineers on how to use



the IP data during the design and how to enforce the specifications during and after the construction of the pavements.

Constructing concrete pavements under the requirements and tolerances provided in the Standard Specifications will result in longer lasting, smoother, and more sustainable concrete pavements.

Key Obstacles

Smoothness enforcement in urban areas may be challenging due to inertial profilers' speed limits and construction complications, including manholes, railroad crossings, and sharp curves.

Meeting the requirements in the Standard Specifications is the responsibility of everyone on the project team (Designers, geotechnical engineers, Project Managers, Resident Engineers, Contractors, etc.). Every project requires sound engineering decisions and good communication throughout the entire project delivery process.

References and Resources

[Caltrans Pavement Smoothness Webpage](#)

Caltrans, 2022. "Standard Specifications."

Caltrans, 2018. "Guidelines for Concrete Pavement Smoothness Requirements."



Environmental Product Declarations (EPDs)

ENVIRONMENTAL IMPACTS	
Declared Products:	
Description: Exterior 4000 PSI	
Compressive strength: 4000 PSI at 28 days	
Declared Unit: 1 m ³ of concrete	
Global Warming Potential (kg CO ₂ -eq)	318
Ozone Depletion Potential (kg CFC-11-eq)	7.15E-6
Acidification Potential (kg SO ₂ -eq)	0.95
Eutrophication Potential (kg N-eq)	0.24
Photochemical Ozone Creation Potential (kg O ₃ -eq)	20.7
Abiotic Depletion, non-fossil (kg Sb-eq)	5.82E-5
Abiotic Depletion, fossil (MJ)	658
Total Waste Disposed (kg)	94.2
Consumption of Freshwater (m ³)	2.40
Product Components: natural aggregate (ASTM C33), Portland cement (ASTM C150), fly ash (ASTM C618), batch water (ASTM C1602), admixture (ASTM C494), admixture (ASTM C260)	

A sample of EPD for a concrete mix (Source: [FHWA](#))

An Environmental Product Declaration for Asphalt Mixtures		
PRODUCT DESCRIPTION		
Gratation Type: dense		
Mix Design Method: superpave		
Nominal Maximum Aggregate Size: 12.5 mm		
Performance Grade of Asphalt Binder: PG 58-28		
This mix producer categorizes this product as a Hot Mix Asphalt (HMA) asphalt mixture.		
This asphalt mixture was produced within a temperature range of 150 to 161°C		
IMPACT CATEGORY	POTENTIAL IMPACT PER METRIC TONNE ASPHALT MIXTURE (PER TON ASPHALT MIXTURE)	
Global warming potential (GWP-100)	71.05 (64.48) kg CO ₂ Equiv.	
Ozone depletion potential (ODP)	9.92E-08 (9.00E-08) kg CFC-11 Equiv.	
Eutrophication potential (EP)	1.24E-02 (1.13E-02) kg N Equiv.	
Acidification potential (AP)	1.72E-01 (1.56E-01) kg SO ₂ Equiv.	
Photochemical ozone creation potential (POCP)	4.51 (4.09) kg O ₃ Equiv.	
DECLARED UNIT: The declared unit is 1 metric tonne (1 short ton) of an asphalt mixture		
PRODUCT INGREDIENTS		
Component	Material	Weight %
Aggregate	Natural Stone	15
Aggregate	Natural Stone	21
Aggregate	Natural Stone	13
Aggregate	Natural Stone	14
Aggregate	Natural Stone	8
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement	24
Binder	Unmodified	4

A sample of EPD for an asphalt mixture (Source: [FHWA](#))

The Impact

An environmental product declaration (EPD), also called Type III Environmental Declaration, is a transparent, objective, and verified report that communicates what a product is made of and how it impacts the environment (e.g., resource



use, energy, emissions). The scope for developing an EPD is referred to as a product category rule (PCR) that provides guidance and defines the requirements for EPDs for a certain product category.

EPDs allow comparisons of the environmental impacts of materials (if they fit into the same PCR) that help agencies make informed decisions on selecting products with less environmental impact. For both agency and industry, EPDs can be used as a tool to track and communicate efforts being made toward sustainability goals and environmental stewardship. Agencies can encourage industry to move toward environmental efficiency by providing incentives to develop and use EPDs. Similar to LCCA, they can be regarded as a tool to evaluate the environmental impacts of various pavement design alternatives and to establish policies and specifications.

Description

Similar to the "nutrition facts" label seen on a food product, EPDs are product labels for manufacturing or production of construction materials (e.g., asphalt, cement, asphalt mixtures, concrete mixtures, or steel reinforcement) that can be used to communicate environmental impacts and quantify greenhouse gas (GHG) emissions. EPDs are developed by industry and they are compliant with the ISO 14025 standard. They are developed based on independently verified life cycle assessment (LCA) procedures and the industry consensus methodology described in the PCR. Most EPDs currently include a "cradle-to-gate" LCA that only includes raw materials extraction, transportation of raw materials to the production facility, manufacturing/production of materials at the facility, and transportation of the product to the plant gate (i.e., before it is transported to the construction site).

Where it's been implemented

The [Buy Clean California Act \(Assembly Bill 262\)](#) originally signed into law on October 15, 2017 mandates collection of EPDs for eligible materials (carbon steel rebar, structural steel, flat glass, and mineral wool board insulation). Through the implementation of the BCCA, California became the first US state to ask for EPDs for these construction materials. Beginning in 2019, Caltrans initiated a pilot study requiring EPDs for hot mix asphalt, aggregates, and concrete in addition to the materials specified by BCCA.

The purpose of the Caltrans EPD Implementation Project is to collect EPDs for materials incorporated into construction projects in order to quantify the GWP emissions in the manufacturing of those materials for our transportation system. In 2023, a joint Caltrans-Industry special working group of the [Pavement and](#)



[Materials Partnering Committee \(PMPC\)](#) was formed. Their objective is to develop and implement specifications for collecting EPDs for concrete and asphalt mixes. In addition, Caltrans has participation in the Federal Highway Administration (FHWA) Climate Challenge in 2023. This pilot program supports the development of EPDs in the asphalt and concrete industries by reimbursing some of the costs it takes to develop EPDs on mixtures used on Caltrans projects.

Key Factors for Success

During the policy and specification development for collection of EPDs and establishing benchmarks, it is important to engage material suppliers, contractors, and other external stakeholders for input regarding the viability of proposals. This effort enhances transparency, accountability, collaboration, communication, and empowerment.

To establish a successful program with consistent and quality EPD data, guidance on how to interpret PCRs to produce EPDs as well as training on how to review EPDs are required for both manufacturers and agencies. The process for developing EPDS must be transparent to be confidently used for reporting and decision-making. Systems for storing data from EPDs should include data quality checks, system consistency, and certification.

Key Obstacles

As noted earlier, cradle-to-gate EPD only represents one stage in the life cycle of a pavement which is material production. Requiring materials with lower environmental impacts may impose tradeoffs in long-term performance and subsequent life-cycle phases. As such, relying only on EPDs and environmental performance without taking long-term performance can be detrimental to the big picture of true sustainability.

References and Resources

[Caltrans Environmental Product Declaration \(EPD\) Webpage](#)

[Lessons Learned from Caltrans Pilot Program for Implementation of EPDs](#)

Warm Mix Asphalt

Potential to reduce emissions associated with asphalt production and placement



The Impact

Warm Mix Asphalt (WMA) is a combination of mechanical and chemical technologies that produce hot mix asphalt at temperatures below 325°F, achieving equal pavement performance. Lower temperatures can help reduce natural gas consumption, reduce emissions, and smoke, during asphalt production.

Description

Hot mix asphalt production requires high temperatures exceeding 325°F to fully coat pavement aggregate, ensuring optimal performance and a tight, uniform, long-lasting mat. This results in a compacted, uniform pavement, preventing air from entering and extending its life.

WMA technologies use mechanical or chemical means to facilitate the coating of the aggregate without the need for higher production temperatures. Depending on the technology used, the production temperature may be



reduced to 10°F to 50°F lower. Some WMA technology also allows improved pavement compaction resulting in a long-lasting mat. Such mix produced at normal production temperature can be hauled over a longer distance and/or placed in a colder paving environment without compromising the long-term pavement performance.

Where It's Been Implemented

In 2006, Caltrans began its evaluation of WMA on state highways. WMA has been used in most of the Caltrans districts, evaluated by the University of California, Davis Pavement Research Center (UCPRC). WMA is allowed at the Contractor's option in Section 39, "Asphalt Concrete," of the Caltrans Standard Specifications.

Key Factors for Success

Caltrans Standard Specifications, Section 39, "Asphalt Concrete," allows the use of WMA at the Contractor's option. Certain districts regularly specify WMA due to challenges with low temperature paving or long hauling distances between the asphalt plant and the project location. Since it is already a tool in the toolbox, Caltrans needs to decide the best way to use WMA to reduce potential emissions.

Key Obstacles

The contracting community and Caltrans need to further discuss the best ways to use WMA as a greenhouse gas emissions tool. There is a risk in lowering production temperatures as it may affect long term performance of asphalt pavement.

References and Resources

[FHWA Warm Mix Asphalt FAQ](#)



Traffic

Reduce Fuel Usage (Coming Soon)

The Impact

Description

Where it's been implemented

Key Factors for Success

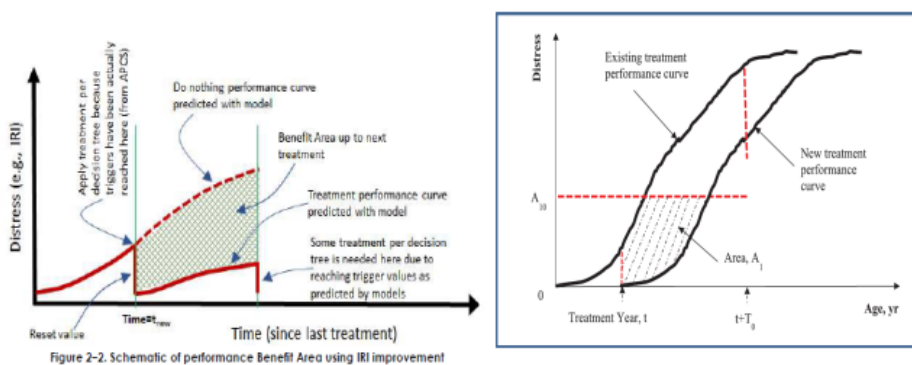
Key Obstacles

References and Resources

Maintenance And Preservation

Pavement Management System (PaveM)

Focusing on developing right treatments at right times to plan and deliver pavement projects more effectively.



The Impact

A fundamental goal of pavement management is to extend service life by treating distress with the right strategy at the right time to efficiently meet performance targets. PaveM incorporates asset management data and leverages economic analyses, including LCCA and Benefit-Cost Analysis (BCA) to apply basic cost and performance data to screen many potential project alternatives. Selecting the proper pavement performance-based objective functions can lead to future projects that minimize GHG emissions, while maintaining near optimal repair cost. Additionally, the reduced fuel consumption could result in substantial user cost savings.

Description

PaveM utilizes pavement performance data to efficiently recommend pavement investments. The system's approach maximizes the return on investment of every pavement dollar, extends pavement life by treating distresses at the right time, and achieves targeted performance goals. PaveM Tools were designed to aid



Caltrans pavement staff in identifying hot spots for needs, focusing on developing right treatments at right times to plan and deliver pavement projects more effectively. Current pavement condition is one of the most critical inputs for PaveM, it is collected through the Automated Pavement Condition Survey (APCS) contract. APCS also provides video images for the entire network. The Automated Pavement Condition Report (APCR) shows current and future pavement condition for any specified project range. It also calculates the State Highway Operation and Protection Program (SHOPP), Rehab effectiveness of the specified projects range.

Where it's been implemented

As the steward of the State Highway System (SHS), Caltrans is responsible for maintaining over 50,000 lane-miles of pavement along more than 255 state and interstate highways. PaveM is Caltrans' state-of-the-art Pavement Management System. Caltrans conducts an APCS to collect pavement data at highway speeds for all lanes along the SHS. The first APCS data was collected in 2015 and 2016.

Key Factors for Success

Pavement condition data shall be as accurate and precise as possible. Caltrans accomplish this by following the Federal Highway Administration's requirement defined in 23 Code of Federal Regulations (CFR) Part 490.319(c), by developing a Data Quality Management Plan (DQMP) that addresses all areas of the pavement condition data collection, quality control, and acceptance processes.

Key Obstacles

Providing data in a in a timely manner and report the results to Caltrans by the Contractor.

References and Resources

Implementing a pavement management system: The Caltrans experience by Tom Pyle and Zhongren Wang, 6 February 2019

End of Life And Recycling

Cold In-Place Recycling (CIR)

Reduce pavement waste and use of new material by recycling existing pavement and base in situ.



The Impact

In conventional asphalt pavement rehabilitation methods, old asphalt is milled, reprocessed, and reused as recycled asphalt pavement (RAP) for new roads. Cold in-place recycling (CIR) addresses some of the issues by reusing existing pavement, further reducing material to landfill and trucking for construction. CIR strategies include Full Depth Recycling (FDR) and Partial Depth Recycling (PDR). The decision whether to use FDR or PDR strategy is primarily based on the origin of the distresses, and whether the goal of Capital Preventive Maintenance (CAPM) or rehabilitation is simply to restore structural capacity or make structural improvements and/or alignment changes.

Description

FDR is a rehabilitation process which involves pulverizing the existing asphalt pavement and parts of the granular base in place to depths of up to 12 inches,



either mixing with a small quantity of foamed asphalt as binding agent (FDR-FA) or cement (FDR-C), grading, and compacting, and overlaying with a new Hot Mix Asphalt (HMA) surface layer. FDR-FA is typically used when the existing pavement contains good quality material with marginal fines after pulverization. If there is significant poor-quality material and fines, then FDR-C should be considered.

PDR is a preventative maintenance or rehabilitation process which involves pulverizing part of the existing asphalt, between 3 to 6 inches, mixing with a small quantity of recycling agent (foamed asphalt or emulsion), grading, and compacting, and overlaying with a new HMA surface layer. The key difference between PDR and other CIR strategies is that a thin layer of existing HMA remains underneath the PDR.

CIR use has increased as sustainability efforts have heightened, and virgin material has increased in costs through economic factors and material supply. The existing pavement layers or upper portion are recycled instead of being hauled away, resulting in decreased removal, and hauling of the existing material to landfills. After mixing and compacting the recycled material, the result is a homogeneous base layer to support a new surface layer. Rubberized Hot Mix Asphalt (RHMA) can be used for the new surface layer which is sustainable. From recent bid analysis, FDR has been shown to be 20 to 30 percent less expensive than traditional removal and replacement methods. PDR has been shown to be up to 20 percent less expensive than an equivalent mill and fill method.

Where it's been implemented

Since 2001, Caltrans has paved several thousands of lane miles of FDR and PDR throughout the California state highway system. Local agencies such as cities and counties also implement CIR on their routes.

Key Factors for Success

As with other pavement rehabilitation strategies, adequate site investigation, proper structural design, life cycle cost analysis, and best construction practices are key to successful CIR projects.

Key Obstacles

As in traditional roadway paving projects, traffic and site conditions determine where CIR strategies can be done. Lack of experience and resistance to the initial costs of paving CIR must be met with education on the necessity and benefits of CIR. Any pavement draining issues must be addressed prior to CIR activities. Also, utilities should be located so the contractor can work around



them or can be considered for relocation or adjustment if utilities would be in the way of operations.

References and Resources

[Caltrans Guide for Partial and Full Depth Pavement Recycling in California](#)

[Caltrans Cold In-Place Recycling Webpage](#)



Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Please refer to Construction Materials Section - [Reclaimed Asphalt Pavement](#).



Recycle Concrete Pavement

Please refer to Construction Materials Section – [Recycle Concrete Pavement](#).



Recycled Aggregates

Please refer to Construction Materials Section – [Recycled Aggregates](#).



Contributors

We are very grateful to Tom Van Dam, James Signore, and Linda Pierce of Nichols Engineering (NCE) and John Harvey, Ali Butt, Iyanuoluwa Filani and Changmo Kim of the University of California Pavement Research Center (UCPRC) who have collaborated with Caltrans on this project.

We also want to thank the many Caltrans employees who have helped develop the Sustainability Pavement Ideas Repository; from the Office of Pavement Executive Management: Hadi Nabizadeh Shahri; from the Office of Asphalt Pavements: Cathrina Barros, Christina Pang, Sri Holikatti, Kee Foo, Saeed Pourtahmasb and Steve Lee; from the Office of Concrete Pavements: Dulce Feldman, Deepak Maskey, Leo Mahserelli, and David Lim; and from the Office of Pavement Programming: Asadollah Noroozi.