



刨除料資源全循環應用技術

工業技術研究院正工程師 / 陳志豪
工業技術研究院研究員 / 游佩蓉
工業技術研究院研究員 / 胡芳瑜
工業技術研究院副研究員 / 彭承祖

關鍵字：刨除料、ITRI 瀝青再生劑、ITRI 生物菌劑、瀝青剝除技術、瀝青砂石分離

摘要

隨著台灣道路柔性鋪面邁向定期養護需求，每年產生達 500 萬噸之瀝青刨除料，但因再利用規範不完善、材料品質變異大，使實際再利用率偏低。為提升刨除料再利用效率，本文提出兩項創新技術路徑。首先，透過工研院開發之 ITRI 瀝青再生劑，有效還原老化瀝青性質，使刨除料可混摻達 50% 並重製為高品質再生瀝青混凝土，驗證結果顯示黏彈性與抗車轍性能可兼備，已成功應用於全台多處道路鋪面。其次，開發「刨除料瀝青砂石分離技術」，結合生物菌劑與瀝青剝除技術，將瀝青與骨材有效分離，產出可完全取代天然砂石之再生骨材與瀝青砂，達成 100% 刨

除料全循環利用。本研究顯示上述技術不僅解決刨除料堆置問題，更有助於減少天然資源依賴，提升鋪面壽命與工程效益，對實現低碳轉型與循環經濟具關鍵貢獻，未來可作為永續鋪面工程之發展方向。

一、台灣鋪面的使用現況

1.1 國內使用柔性鋪面為大宗

根據交通部統計查詢網 [1] 資料，截至 2023 年台灣道路長度為 42,992 公里，道路面積已超過 5 億平方公尺，且近十年來，台灣道路面積平均每年仍有 1% 成長幅度，以上資訊可預期國內每年身負龐大的道路養護需求。



國內道路鋪面面層材料，大多以瀝青混凝土（Asphalt Concrete, AC）為主，稱之柔性鋪面，組成為砂石（約 95%）與瀝青（約 5%）。依據經濟部礦物局土石資源服務平台 [2] 數據可知，全台每年砂石使用量約 7,000 萬噸，其中自產砂石量約 3,000 ~ 4,000 萬噸，無法滿足國內需求，不足的砂石量多由進口砂石補充。而每年使用於柔性鋪面的砂石約 670 萬噸，占比為全年砂石使用量的一成左右，也是全台砂石的第二大用途。

1.2 國內柔性鋪面刨除後的問題

國內當前路面養護多以刨除重鋪為主，換言之，每年因道路修繕而被挖（刨）除的柔性鋪面物料，稱之為刨除料（Reclaimed Asphalt Pavement, RAP），相對應產出約 500 ~ 600 萬噸左右。

目前刨除料再利用可作為基、底層及施工便道鋪築材料，但重劃區與新闢道路相對少，故應用量少；另外，將刨除料添加再生劑，使刨除料恢復原有材料性質，再加入新粒料調整級配與新瀝青拌合後，重新作為道路面層鋪築之用，明確定義在「公共工程施工綱要規範第 02966 章再生瀝青混凝土鋪面」，也是再利用途徑之一。但是，工程驗收條件無法如實呈現鋪面品質，使得主辦機關在標案設計中避免使用刨除料。以上種種因素，導致全國刨除料的再生應用比率低，僅 18%，其中中央 8%、地方 28%、六都 24% ~ 46%。

根據台灣區瀝青工業同業公會於 2018 年調查全國刨除料數量，估計全台刨除料約有

2,100 萬噸 [3]。時至今日，刨除料刨鋪不平衡的現狀仍然存在，可預見累計的刨除料堆置數量只有更多，遠超過業者可承受的環境負荷能力，廠區又受環保法規約束與各縣市政府環保單位稽查，業者常因刨除料堆置問題而被連續開罰。

二、拓展多元刨除料應用路徑

但一味的由刨除料去化角度，要求主辦機關使用刨除料再生瀝青混凝土，實為越俎代庖，應由正確的規範指引，以確保良好的鋪面品質，才能讓主辦機關敢用、願意用。以下由刨除料材料的角度切入，提出更臻完善工程規範作參考，以確保維持鋪面品質與延長道路壽命效益。另外，目前第 02966 章再生瀝青混凝土鋪面（V7.0 版）規範刨除料添加上限為 40%，所餘 60% 仍無法使用。因此尋求刨除料其他去化辦法，亦迫在眉睫，工研院進而開發刨除料全循環技術，將刨除料上瀝青與砂石分離，再予以各別利用。多元刨除料再利用相關技術說明如下。

2.1 再生瀝青混凝土

2.1.1 刨除料

刨除料主要組成為砂石與老化瀝青。刨除後的砂石性質不會改變，僅粒料尺寸的變化，具降級的現象；然瀝青的質變，對再利用的影響較為顯著。瀝青組成複雜可概分四種類別，分別是烷烴類（Saturates）、芳香烴（Aromatic）、膠質（Resins）與瀝青質（Asphaltenes）。而瀝青老化的原因，係開放



交通使用期間鋪面受車輪摩擦、日曬與空氣及水的接觸，瀝青長期氧化，相對較輕質的化合物（烷烴類、芳香烴、膠質）逐漸聚合成硬質的化合物（瀝青質）。

當瀝青質占比逐漸增加，表示瀝青老化程度逐漸增高，對應的參數包括黏度高，針入度低。一般全新料現地鋪築，初始之瀝青黏度設計在 3,250 ~ 6,750 poise 之間；使用後刨除之老化瀝青黏度提升至 10 ~ 50 萬 poise，中南部尤為嚴重，黏度飆升至 50 ~ 200 萬 poise 的刨除料大有所在。另外，瀝青老化作為結合料的特性變化 [4]，還包含延展性和滲透性降低，與軟化點和閃火點升高；至於機械性能變化，由於老化瀝青變硬，剛度增加，瀝青混合料對永久變形的抵抗力和承載能力提高，但也因又硬又脆，在低溫下容易崩解或疲勞開裂。在國際的研究中 [5]，刨除料混摻比例 < 20%，可以直接加入新瀝青，仍保有的混合料的黏彈性與施工性；當混摻比例 > 20%，則需要額外加入瀝青再生劑，讓老化瀝青回復原有的性質，才能確保鋪面品質。除此之外，影響瀝青再生劑添加量，還有一因

子，即瀝青的老化程度，越老化，瀝青再生劑添加量需要提高。

2.1.2 ITRI 瀝青再生劑

依據施工綱要規範第 02966 章 (V7.0 版)，若使用再生劑材料應符合 CNS 15359 之規定。工研院所開發瀝青再生劑產品，符合 CNS 15359 之規定，屬於 RA1 等級，如表 1 說明。ITRI 瀝青再生劑產品原料源自生質物，非石化產品，具環境友善性，能還原老化瀝青，並有助於新舊瀝青相容之特性。研究初期，針對不同老化程度刨除料，與 ITRI 瀝青再生劑添加量作探討，結果於表 2 所示。再生瀝青混凝土在驗收含油量時，再生劑會被萃取計算在含油量內。因此，再生劑添加量控制很重要，添加比例不宜多，仍需足夠的新瀝青，來滿足粒料的黏結性。ITRI 瀝青再生劑使用量，即便是老化程度高的刨除料（94 萬 poise），RAP 的混摻比例高達 50%，其再生劑添加量也只占每單位再生瀝青混凝土重量的千分之 2，占總含油量重量百分之 4，再製的混合料黏度亦可如新料組成一般，落在 3,250 ~ 6,750 poise 之間。

表 1 ITRI 瀝青再生劑產品規格

	標準號	RA1 等級	ITRI 瀝青再生劑
黏度，60°C (cS)	CNS 14249	50 ~ 175	69
閃火點 (°C)	CNS 3775	> 218	230
飽和度 (wt.%)	-	< 30	0.42
以薄膜烘箱 (163°C) 試驗後之殘餘物測試，CNS 14250 或 CNS 14937			
黏度比	-	> 3	0.42
重量變化，± (%)	-	> 4	-3.34
比重	-	依報告	0.936



表 2 不同老化程度的刨除料使用 ITRI 瀝青再生劑後之混合料黏度變化

RAP 老化程度，黏度，60°C (Poise)	每單位再生瀝青混凝土混合料		再生劑占總含油量比例 (%)	混合料黏度，60°C (Poise)
	RAP 添加比例 (%)	再生劑添加比例 (%)		
20 萬	30	0.08	1.6	4,840
	40	0.1	2.0	4,200
	50	0.11	2.2	4,100
	60	0.12	2.4	4,300
94 萬	30	0.15	3.0	5,300
	40	0.17	3.4	4,800
	50	0.20	4.0	4,100

2.1.3 再生瀝青混凝土成效

國際上針對刨除料混摻（比例 < 30%）轉製再生瀝青混凝土，與全新瀝青混凝土進行研究比較，實驗室結果與現地鋪築 6 ~ 17 年的驗證 [6]，再生瀝青混凝土在永久變形部分，顯示出比全新瀝青混凝土具有相同或更優異的性能。當刨除料混摻比例高（40% ~ 50%）的再生瀝青混凝土，抗車轍性能都沒有問題，除非使用錯誤的再生劑或添加太多量。更甚者，依據國家、區域的地理環境，再區分與評估瀝青混凝土混摻刨除料的必要性，在熱的環境使用刨除料，具優化道路性能之效益；在冷的區域使用刨除料，則有疲勞開裂的現象 [7]。以台灣而言，介於熱帶與亞熱帶間，屬於高溫多雨環境，因此，刨除料直接再利用重回鋪面是合適的。

柔性鋪面在抗車轍性能測試上，國際上多使用濕式漢堡輪跡試驗作為指標，是一種對瀝青混凝土試體進行嚴苛的水浸害評估方法，係利用一組加載 705N 的鋼輪，對浸泡在水中（50°C）之瀝青混凝土試體進行來回的往覆運動，目的在綜合評估瀝青混合料抵抗車轍與剝脫（水浸害）的潛能，其建議值為

當鋼輪來回滾壓 12,000 次，車轍深度不得大於 12.5 mm。國內尚未訂定明確之國家標準，目前參考國際標準 AASHTO T 324 試驗方法。

目前，國內瀝青分類採用 25°C 針入度或 60°C 黏滯度，僅判別瀝青軟硬程度。因此，本研究將瀝青材料物性分析結果，搭配瀝青混凝土的濕式漢堡輪跡試驗，要求同時符合數值限制，以確保鋪面的品質。表 3 為使用 ITRI 瀝青再生劑產製之再生瀝青混凝土，可同時通過代表柔性的黏度指標與代表剛性的濕式漢堡輪跡試驗結果。當使用 40% 刨除料搭配 0.1% ITRI 瀝青再生劑，添加新瀝青 AC10，完成配合設計後，瀝青混凝土試體黏度為 5,730 poise，當輪跡試驗車轍下陷深度為 12.5 mm，鋼輪來回滾壓達 16,612 次，符合標準 > 12,000 次，顯示再生瀝青混凝土剛性與柔性兼備。

目前，添加 ITRI 瀝青再生劑製得之再生瀝青混凝土已在全台各地鋪設，涵蓋新北、桃園、新竹、苗栗、台中、彰化、台南、高雄、屏東、宜蘭及花蓮等地，鋪設面積達 2,600 萬平方公尺，且所有工程均通過驗收，充分證明技術的可靠性與有效性。



2.1.4 動態剪切流變儀試驗 (Dynamic Shear Rheometer, DSR)

關於再生瀝青鋪面的性能表現，其關鍵取決生產過程中 RAP 結合料的活化程度 [7]。在國內，交通部公路總局，鋪面工程曾採用動態剪切流變儀試驗作為驗收指標，量測瀝青膠泥的複合模數 G^* (Complex Shear Modulus)，研擬在 64°C 條件，限定 G^* 值應 $< 10 \text{ kPa}$ 。 G^* 值可以判斷瀝青分子間作用力的差異。當 G^* 值越大，代表瀝青質相互鍵結與聚集現象明顯，由此可檢視刨除料添加量或老化瀝青程度的合理性。由添加再生劑的角度切入，當添加對的再生劑，使老化瀝青整體組成比例調整與新瀝青較一致，讓再生劑具活化效果，可與瀝青質相容性提

升，使聚合作用不顯著，則 G^* 值就下降；反之，不對的再生劑，與老化瀝青相容性較差，使瀝青質聚合作用顯著，則 G^* 值變大，故推測可藉此判斷使用的再生劑材料合理性。

添加 ITRI 瀝青再生劑之再生瀝青混凝土試體，依不同刨除料黏度，調整刨除料使用比例，23.2 萬 poise 刨除料，重新配合設計占比 60%，再生劑添加量 0.1%；而極老化 (> 100 萬 poise) 的刨除料，重新配合設計占比 40%，再生劑添加量上限仍不超過 0.2%，皆可使瀝青黏度符合 3,250 ~ 6,750 poise 之間，而 G^* 值皆符合 $< 10 \text{ kPa}$ 以下，如表 4 所示。顯示 ITRI 瀝青再生劑與瀝青質具相容效果。

表 3 再生瀝青混凝土黏度及漢堡輪跡試驗均符合規範

再生瀝青混凝土：40% 刨除料 + 0.1% ITRI 瀝青再生劑 + AC10		
成效	黏度 (poise)	5,730
	濕式漢堡輪跡 (下陷深度 12.5 mm 之滾壓次數)	平均：16,612；SD:611.62

表 4 再生瀝青混凝土黏度及 DSR 複合模數 G^*

分析項目	實驗組數 1	實驗組數 2
刨除料黏度 (poise)	232,000	$> 1,000,000$
再生劑添加量 (%)	0.1	0.2
刨除料比例 (%)	60	40
刨除料含油量 (%)	4	3.5
新瀝青 AC10 添加量 (%)	2	2.9
瀝青混凝土試體最終含油量 (%)	4.5	4.5
瀝青混凝土試體萃取瀝青		
黏度 (poise)	3,784	5,784
DSR 複合模數 G^* (kPa)	3.16	7.33



2.2 刨除料瀝青砂石分離技術

刨除料除了再生瀝青混凝土應用，為加速去化與資源整合應用，工研院進而開發「刨除料瀝青砂石分離技術」，邁向「刨除料全循環再生應用藍圖」(如圖 1)。本技術運用「生物菌劑」搭配「瀝青剝除技術」，成功將刨除料重生成為 70% 再生石及 30% 瀝青砂，搭配本院瀝青再生劑，即可 100% 將刨除料重新應用於道路鋪面。

2.2.1 生物菌劑

本技術所開發的「生物菌劑」，主要由重油污染土壤中，篩選與馴養獲得可降黏瀝青的環境微生物。篩選過程中以重油為唯一碳源，最終選取可高效分解重油做為生長碳源之菌株，由此可得到適宜降解瀝青中直鏈烷烴、芳香烴及瀝青質的菌株。且本技術所使用的菌株經驗證微生物分級為 RG1，屬對人



圖 1 刨除料全循環再生應用藍圖

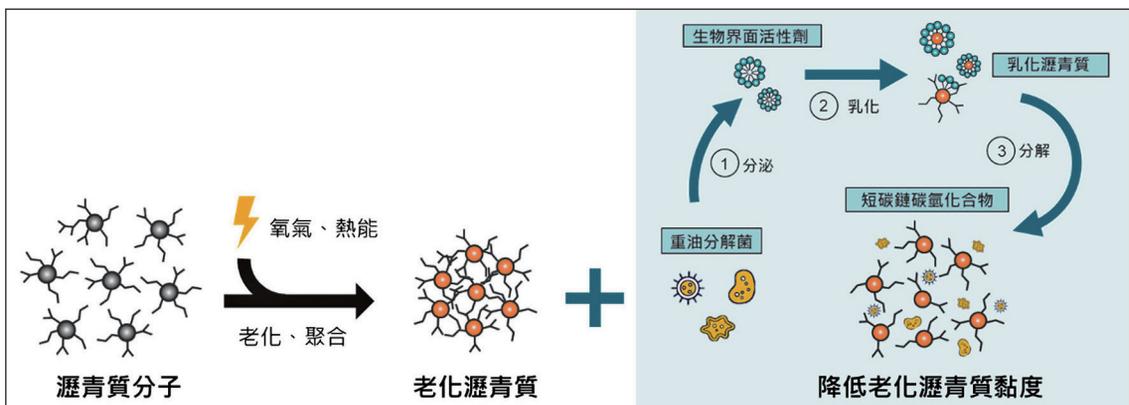


圖 2 生物菌劑降黏原理



體／環境造成危害的風險是最低的，顯示實際應用產品為安全無害的。

2.2.2 瀝青剝除技術

剝除料與生物菌劑接觸後，再導入「瀝青剝除技術」，以水作為載體，將剝除料浸置其中，並讓剝除料間進行碰撞，藉由水將細小的瀝青膠泥粉體帶出，並因極性的不同，可避免瀝青膠泥重新附著於石料表面，達到剝除料瀝青／砂石分離的目的。技術系統設計與運轉參數得以讓砂石保有完整破裂面與菱角，最終可獲得粒徑 > 2 mm 與低瀝青含量 (< 1%) 之再生石，以及粒徑 < 2 mm 且高瀝青含量 (> 5%) 之瀝青砂 (如圖 3)。

其中，再生石可符合 CNS15308 瀝青鋪面混合料用粗粒料標準 (如表 5)，代表其品質已符合全新砂石標準，未來可以新砂石形式使用，將不再受限於剝除料 40% 的使用限制。

2.2.3 分離後再生石及瀝青砂配合設計

本技術有效消除剝除料應用於再生瀝青混凝土之假粒徑、瀝青老化程度不一、瀝青

含量不均等困境，將剝除料瀝青／砂石分離並透過水循環系統，分級骨材真粒徑，濃縮瀝青並使其均質化。將分離後的再生石與瀝青砂重新進行配合設計，搭配 ITRI 瀝青再生劑，以重載車流模擬下，皆可滿足馬歇爾法的試驗要求，詳如表 6 所示。依目前的試驗結果，從剝除料分離的再生石及瀝青砂重新配合設計，再利用的量已突破 85%，預期取得篩分更臻完善再生石與瀝青砂，未來可達成 100% 全循環再利用。

除此之外，再生石可適用於各式工程粒料，如控制性低強度回填材料 (Controlled Low Strength Materials, CLSM) 等，亦達成讓物料循環再生 100% 應用，進而解決砂石短缺、剝除料堆置問題，也達成「循環經濟」體系中零廢棄最終理想目標，並可降低了對

表 5 再生石符合 CNS 15308 瀝青鋪面混合料用粗粒料標準

級配料試驗項目	分離後砂石	
	試驗值	規範值
洛杉磯磨損試驗 (%)	17	≤ 40
粒料中破碎顆粒含量 (%)	96	≥ 90
粒料健度試驗 (%)	0.4	≤ 12



圖 3 剝除料瀝青剝除成果



表 6 再生石及瀝青砂配合設計

混合料種類	12.5 mm 密級配									
	50% 再生石 +50% 天然砂					55% 再生石 +30% 瀝青砂 +ITRI 瀝青再生劑				
粒料組成	1 cm	0.8 cm	0.5 cm	天然砂	填縫料	1cm	0.8 cm	0.5 cm	天然砂	瀝青砂 ^{註 1}
	10	10	29	49	2	10	10	35	15	30
建議瀝青含量 (%)	5.1					4.5				
ITRI 再生劑添加量 (%)	0					0.35				
新瀝青添加量 (%)	5.1					2.1				
單位重 (kg/m ³)	2379					2377				
穩定值 (kgf) ^{註 2}	1397					1464				
流度值 (0.01cm) ^{註 3}	9					14				
空隙率	4					3.9				

註 1：瀝青砂含油量 7.8%，黏度 91.36 萬 poise。

註 2：穩定值標準 > 817 kgf。

註 3：流度值標準介於 8~14 之間。

天然資源和外國進口的依賴，對國家 2050 淨零排放政策有持續發展可行性。

2.2.4 落實商業化

比較現有瀝青砂石分離技術 [8] (如表

7)，使用化學技術，因大量使用有機溶劑，建廠與營運成本過高，每噸處理費用 2,000 元以上，難以落實商業化。本技術以水為介質，且可回收再使用，大幅降低處理成本，每噸處理費用 300 元以下，以每噸瀝青混凝土材料價值 1,500 元評估，業界均認為極具商業化價值。

表 7 刨除料瀝青砂石分離技術比較 [8]

技術類型	既有技術		工研院創新技術
	物理技術	化學技術	
技術特性	靠機械衝擊進行兩種材料的分離分離，屬剛性破碎。	使用化學溶劑（有機溶液、熱鹼溶液、強氧化劑）溶解瀝青，技術系統應包括混合溶液透過萃取、濃縮分離瀝青與溶劑。	由培育自然界微生物，使改變老化瀝青與砂石的黏結力，再透過水為載體，讓刨除料間產生碰撞、摩擦外力，使瀝青膠泥脫離石料表面達到分離的作用。
優點	成熟技術，成本低。	能徹底分離瀝青和砂石，分離效率高。	環保、成本低、分離效率佳。水全循環。
缺點	瀝青殘留在骨料表面仍多。仍存在假粒徑現象。	使用化學溶劑有環境安全、工作安全疑慮，成本高，設備等級高。	-
技術成熟度	成熟相對技術，應用於冷再生技術較多。	屬於工業化早期階段，但成本高，工業化困難度高。	TRL 等級為 8，已有業者投資建廠中。
成本	低	高	低—中等。



本技術以創新思維開拓產業應用新局，成功將科研成果轉化為具體價值，為傳統營建產業注入升級轉型的新動能。於 2024 年 8 月與業界合作簽訂「刨除料瀝青砂石分離建廠計畫」，年處理量可達 8 萬噸刨除料，預計 2025 年底完工。

未來技術擴大應用，以每年 500 萬噸刨除料處理量推估，將可產製 350 萬噸再生砂石，減少天然砂石開採需求，相當於滿足國內砂石需求的 10%，大幅緩解天然資源短缺的壓力；再生瀝青砂則可替代 15 萬噸化石瀝青，助力營造業每年減少 27 萬噸碳排放，展現低碳環保的強大效益。估每年可創造超過 80 億元產業產值，將傳統瀝青產業轉型成為低碳鋪面材料供應者，不僅促進經濟效益，亦推動循環經濟產業的全新成長動能。

三、總結

面對全球減碳趨勢與循環經濟政策目標，提升道路鋪面材料的循環利用率，不僅是工程技術的革新，更是國家永續發展的重要戰略。

本文提出兩大創新技術路徑，有效拓展刨除料的應用可能性。其一為「ITRI 瀝青再生劑」的應用，成功還原老化瀝青特性，提升再生瀝青混凝土之鋪面性能與耐久性，並已在全台多地區完成鋪設驗證，技術穩定且具實績佐證；其二為「刨除料瀝青砂石分離技術」，運用生物菌劑與瀝青剝除技術，實現刨除料中瀝青與骨材的高效分離與再製，使原本受限於刨除料比例的再生混凝土，達到近乎 100% 的循環再利用目標。

兩者技術不僅解決刨除料堆置與資源浪費問題，更大幅降低對進口砂石與天然資源的依賴，並落實從源頭減碳、減廢到末端高值化利用的全循環經濟理念。展望未來，隨著相關規範與制度的完善，刨除料多元再利用的推動將成為連結工程效益、環境保護與產業升級的關鍵環節，進一步助力國家邁向 2050 淨零碳排的永續目標。

參考文獻

1. 交通部統計查詢網, <https://stat.thb.gov.tw/hb01/webMain.aspx?sys=100&funid=51100>
2. 經濟部礦物局土石資源服務平台, <https://amis.mine.gov.tw/>
3. 顏寬恒、林紫婕,「瀝青的現在未來方程式」, 土木水利, 第四十九卷, 第四期, 2022 年。
4. Okan Sirin, Dalim K. Paul, Emad Kassem, "State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives", *Advances in Civil Engineering*, 2018.
5. Brett A. Williams, J. Richard Willis, Ph.D., Joseph Shacat, "Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt", National Asphalt Pavement Association, Federal Highway Administration Office, 2019.
6. Copeland, A., "Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice", Federal Highway Administration, McLean County, 2011.
7. Jiangmiao Yu, Zengyao Lin, Guilian Zou, Huayang Yu, Zhen Leng, Yuan Zhang, "Long-term performance of recycled asphalt mixtures containing high RAP and RAS", *Journal of Road Engineering*, vol.4, 36-53, 2024.
8. Decheng Feng, Jiwei Cao, Libo Gao, Junyan Yi, "Recent developments in asphalt-aggregate separation technology for reclaimed asphalt pavement", *Journal of Road Engineering*, vol. 2, 332-347, 2022.