

組合式 GFRP 梁-版系統於公路橋梁之研究

李有豐¹、林毓瑛²、*沈銘原³

¹國立台北科技大學土木工程系、²國立台北科技大學土木與防災研究所、³國立勤益科技大學機械工程系

*myshen@ncut.edu.tw

摘要

本文以不同斷面之玻璃纖維強化高分子(glass fiber reinforced plastic, GFRP)複合材料梁構件，組成組合式 GFRP 梁構件，再以此 GFRP 組合梁、與 GFRP 版製作成 GFRP 梁-版系統，分別進行三點抗彎試驗。將各 GFRP 組合梁構件及 GFRP 梁-版系統之極限載重、勁度及破壞模式等，與單一 GFRP 構件比較。由試驗結果得知 GFRP 組合梁構件可有效提升強度及勁度，另外採用 Timoshenko 梁理論解來計算 GFRP 組合梁構件的力-位移關係。由試驗結果了解各種 GFRP 組合式梁-版系統結構受行為，找出較佳提升 GFRP 組合式梁-版系統勁度及強度的方法。再以 ANSYS 有限元素分析 GFRP 組合式梁-版系統，將分析與實驗結果進行比較，二者結果相當吻合。本文透過試驗與分析之方式，進行組合式 GFRP 梁-版系統破壞模式探討，確保組合式 GFRP 梁-版系統應用於公路橋梁的安全性。

關鍵詞：纖維強化高分子、組合式梁、組合式梁-版系統、三點抗彎試驗

A Study on the Application of the Combined GFRP Beam-Deck System to Highway Bridges

Yeou-Fong Li¹, Yu-Ying Lin², *Ming-Yuan Shen³

¹Department of Civil Engineering, National Taipei University of Technology

²Institute of Civil and Disaster Prevention Engineering, National Taipei University of Technology

³Department of Mechanical Engineering, National Chin-Yi University of Technology

Abstract

In this paper, different cross-sections of glass fiber reinforced polymer (GFRP) beam members were glued together as the combined GFRP beam members. Then, the GFRP combined beams were glued to GFRP plate to become the GFRP combined beam-deck system. From the three-point bending test results, the ultimate load, stiffness and failure modes of GFRP combined beam members and GFRP combined beam-beam system are compared with a single GFRP member. The experimental results show that GFRP combined beam members can effectively improve the strength and stiffness. The Timoshenko beam theory was used to calculate the force-displacement relationship of GFRP combined beam members. From the three-point bending test result of GFRP combined beam-deck systems, we understand the method can improve the stiffness and strength of GFRP combined beam-deck system. The ANSYS finite element program was used to analyze GFRP composite beam-deck system, and the analysis matches experimental results. Through the experiment and analysis, this paper discusses the failure mode of the combined GFRP beam-deck system and ensures the safety of the combined GFRP beam-deck system can be applied to the highway bridge.

Keywords: Fiber Reinforced Plastic (FRP), Combined Beam, Combined Beam-Deck System, Three-Point Bending Test

Received: Mar. 7, 2018; first revised: Jun. 1, 2018, second revised: Dec. 10, 2018; accepted: Apr. 2019.

Corresponding author: M.-Y. Shen, Department of Mechanical Engineering, National Chin-Yi University of Technology, Taichung 41170, Taiwan.

壹、前言

因全球氣候變遷，颱風或是短時間強降雨，常造成老舊橋梁之毀損。其中以 2008 年 9 月辛樂克颱風造成省道臺 13 線后豐大橋、臺 21 線牛眠橋、臺 18 線五虎寮橋及臺 20 線甲仙大橋等倒塌；2009 年 8 月莫拉克颱風因短時間的驚人雨量，總計全國 110 餘座橋梁損傷，其中的 52 座跨河橋之橋墩更是遭到沖毀。公路橋梁為交通運輸與民生活動的重要管道，若因中斷而無法對外聯繫，將使災區猶如孤島一般，亟待救援及物資的運送。在臺灣常見的臨時跨河便橋分別有混凝土(RC)涵管便道、鋼涵管便道、與鋼便橋等。

RC 涵管便道是於行水區埋設 RC 涵管，非行水區由土石堆疊成簡易通道。RC 涵管通水量較小，遇大雨可能無法及時宣洩，容易因上游之石塊、流木造成涵管堵塞，通水斷面降低。鋼涵管便道於行水區埋設鋼涵管，非行水區由土石堆疊成簡易通道，一般而言鋼涵管通水量較 RC 涵管為大，遇大雨時其宣洩水流之情況較 RC 涵管好。鋼便橋係以鋼梁架設於既有或臨時之橋台上，並於其上鋪設鋼板之簡易通行橋梁，一般多以貨櫃填充卵石或混凝土作為臨時橋台。鋼便橋在組立時，須先進行現勘作業，依災區現況、跨度及河道形式等不同的現地狀況進行設計，故須花較多的時間才能完成。

本文利用玻璃纖維強化高分子複合材料(glass fiber reinforcement plastic, GFRP)具有質量輕、強度高與耐候性佳的特性，提出一種易搬運、現地組裝便利，且可以提供足夠安全性的 GFRP 緊急救災便橋。並透過實驗與分析的方試探討 GFRP 緊急救災便橋的力學行為探討。

貳、文獻回顧

茲將國內外關於 FRP 材料特性與力學行為之相關研究的研究成果簡述如下。Bank 等人(2010)以拉擠成型 GFRP 版和混凝土組成混合結構構件[1]，以 GFRP 拉擠成型版作為橋面版。探討兩種結構混合的結構行為其混合系統之行為結果可行，並應用於美國威斯康辛州(Wisconsin)公路上建造 200 公厘混合版系統的橋面版。Mendes 等人(2011)設計兩種材料複合的單跨長度 12 公尺 I 型斷面人行橋[2]；並於 I 型梁下翼版貼上一層碳纖維貼片增加其抗拉強度。再以有限元素進行力學分析。並建置結構監測系統，評估其長期變形、極限狀態荷載之行為。Ji 等人(2011)將 GFRP 格柵版上下放置 GFRP 薄版，並於下方薄版以方形鋼管接合，進行實際尺寸之橋面版製作[3]。透過三點抗彎試驗與有限元素分析做比較探討其力學行為。El - Hacha 等人(2012)將 GFRP 空心矩形斷面梁，上部使用一層高性能混凝土(UHPC)，下部使用 CFRP 或 SFRP 梁的方式進行梁試體的製作[4]。試驗規劃四種混合梁，進行四點抗彎曲載重試驗。試驗結果得知混合梁有較高的彎曲強度和勁度。

Li 與 Kan (2011)進行 GFRP 梁三點抗彎實驗，實驗結果顯示 GFRP 原型梁於極限載重作用時，腹版處積材局部壓碎[5]。為避免腹版局部壓碎破壞，分別於 GFRP 梁內填充環氧樹脂砂漿並外層包覆混編之纖維布，再進行梁構件三點抗彎實驗。實驗結果顯示環氧樹脂砂漿具有良好之膠結性，且構件外層包覆的 90°方向纖維能提供 GFRP 梁受力變形時足夠的圍束能力。吳嘉濠(2012)以拉擠成型之 GFRP 版構材進行三點抗彎實驗，於極限荷重作用下，破壞模式為受力處沿纖維方向進行開裂[6]。故另將拉擠成型 GFRP 版構材包覆 90° 方向之玄武岩纖維及混編纖維。實驗結果顯示，包覆 90° 方向之版構件，極限承載能力有明顯的提高。陳彥鈞(2012)以 GFRP 之 I 型梁與平版構件以配置不同位置的隔梁進行梁-版系統的加勁，再將各加勁梁-版系統進行三點抗彎實驗，並進行續接的試驗[7]。實驗結果發現不同格梁位置之配置會影響梁-版系統之勁度。而各不同加勁型式之 GFRP 梁-版系統其極限強度是由梁版接合之方式控制。Li 與 Wu(2013)以手積疊層之 BFRP 版進行版構件之三點抗彎實驗，實驗結果顯示，BFRP 因側版厚度過薄，力量加載時發生側版挫曲之現象，於極限荷重作用下發生腹版剪切破壞[8]。由其力與位移圖可發現，受力與變位關係呈線性，無明顯降伏點即產生破壞。Li 等人以有限元素模擬的方式，分別進行各種不同

螺栓接合型式之 FRP 構件剪力強度有限元素模擬，並將分析結果與 FRP 構件螺栓接合試驗比較，二者的結果相當吻合[9-10]。

參、纖維強化高分子複合材料力學性質

GFRP 材料具有質量輕、強度高與耐候性佳的特性，它與土木工程常用碳鋼材料比較，其比強度為碳鋼的 10 倍左右。FRP 材料為異向性材料，其強度與纖維的分布方向、纖維的長短以及纖維與基材(matrix)的比例有密切的關係[11]。連續纖維 FRP 材料之纖維方向拉伸強度，係由纖維與基材共同提供。纖維與基材兩者的應力關係如式(1)所示，其中 σ_c 為纖維強化高分子複合材料之應力， σ_m 、 σ_f 則分別為纖維和基材的拉伸應力， ϕ_m 、 ϕ_f 則為纖維與基材的體積分率。

$$\sigma_c = \phi_f \sigma_f + \phi_m \sigma_m \quad (1)$$

式(1)僅適用於單軸向之複合材料，若纖維對基材之排列具有角度則複合材料的強度將會因纖維排列的角度而有所不同。故一般複合材料的主要強度係分為由縱軸拉伸應力(longitudinal tensile strength)，橫軸拉伸應力(transverse tensile strength)以及剪應力(shear strength)三種應力共同控制。在此三種應力與纖維及基材間的應力關係，須導入一角度關係，如式(2)所示。式(2)係由實驗而得的經驗公式，不適用於所有纖維強化高分子複合材料上，故實務上若欲使用纖維強化高分子複合材料，應要求製造商提供相關的材料參數，並進行相關實驗，以確保該材料之適用性。

$$\frac{1}{\sigma_{c\theta}^2} = \frac{\cos^4 \theta}{\sigma_{CL}^2} + \left(\frac{1}{\sigma_{CS}^2} - \frac{1}{\sigma_{CL}^2} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{\sigma_{CT}^2} \quad (2)$$

連續纖維強化高分子複合材料之彈性模數係由多個不同的材料組合而成，故其彈性模數以線性疊加的方式進行推算，其通式如式(3)[12]。其中 ϕ_m 為基材之體積分率(volume fraction)， ϕ_f 為纖維的體積分率，基材的體積分率為 ϕ_m ，與纖維體積分率之關係為 $\phi_m = 1 - \phi_f$ 。 E_m 為基材的彈性模數， E_f 為纖維的彈性模數， f_{orient} 為定向因素(orientation factor)。

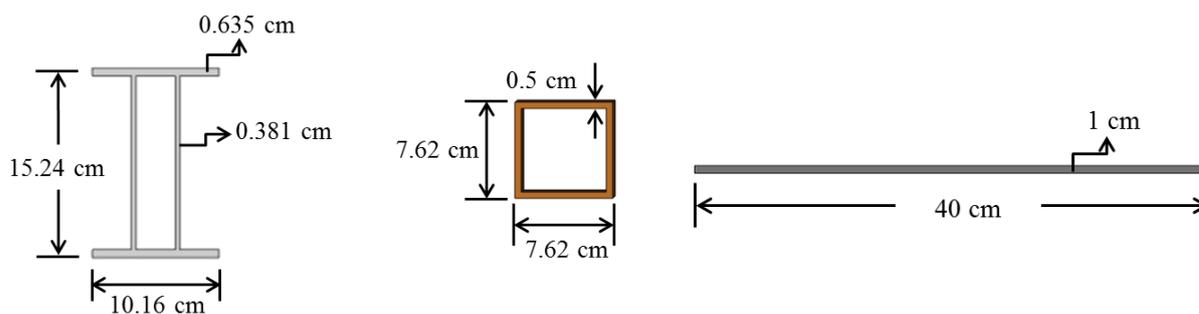
$$E_c = \phi_m E_m + f_{orient} \phi_f E_f \quad (3)$$

由於連續纖維做成之 FRP 複合材料，其強度高於不連續纖維，故本研究選用穩定度高且連續纖維配置的拉擠成型的 GFRP 構件，進行組合式 GFRP 梁-版系統力學行為的研究。

肆、GFRP 組合梁與 GFRP 組合梁-版系統試體規劃

一、GFRP 組合梁試體規劃

本文選用雙腹版 I 形梁(double web I beam)及方管梁(square beam)兩種構件進行組合梁構件與組合式梁-版系統試體之製作。其中 GFRP 平版(plate)，雙腹版 I 形梁或是方管梁，之構件斷面尺寸如圖 1 所示，材料性質則如表 1 所示。組合梁之形式及跨深比則如表 2 所示。



(a)雙腹版 I 形梁斷面尺寸

(b)方管梁斷面尺寸

(c)平版斷面尺寸

圖 1 GFRP 構件斷面尺寸

表 1 組合梁構尺寸與跨深比

項目	數值
抗拉應力(MPa)	207
抗拉模數(MPa)	20,690
抗壓應力(MPa)	207
抗壓模數(MPa)	20,690
剪力模數(MPa)	3,724

表 2 組合梁構尺寸與跨深比

梁斷面	梁深(cm)	梁寬(cm)	翼版厚(cm)	腹版厚(cm)	跨度(cm)	跨深比
	15.24	10.16	0.635	0.381	90	5.91
	15.24	7.62	0.5	0.5	90	5.91
	15.24	7.62	0.5	0.5	190	12.47
	15.24	15.24	0.5	0.5	90	5.91
	15.24	15.24	0.5	0.5	190	12.47

亦透過 GFRP 構件組合的方式，或是於組合梁內灌注環氧樹脂砂漿的方式，以提升組合式 GFRP 梁構件的勁度。GFRP 組合梁試體的命名分別為，BP 為原型雙腹版 I 形梁構件；BR 為雙腹版 I 形梁構件內填 GFRP 矩形管；BRE 為雙腹版 I 形梁構件內填 GFRP 矩形管，上下澆置環氧樹脂砂漿；S 為 GFRP 方管原型梁；S2C 為由兩個 GFRP 方管梁構件組合成日字型梁，並於外側包覆兩層 90 度單方向之碳纖維貼片；S4C 為由四個 GFRP 方管梁構件組合成田字型梁，並於田字型梁外側包覆兩層 90 度單方向之碳纖維貼片。試體的命名如表 3 所示。

二、GFRP 組合梁-版系統試體規劃

組合式梁-版系統的試體規劃，其中 BPP 為原形雙腹版 I 形梁構件，放置三個梁構件；BRP 為雙腹版 I 形梁構件內填矩形管，其中雙腹版 I 形梁與矩形管係以樹脂進行接合，並放置三個梁構件；BREP 為雙腹版 I 形梁構件亦使用樹脂將內填矩形進行接合，再於上下澆置環氧樹脂砂漿，放置三個梁構件；S4P 為由四個方管梁製成田字型梁，外側包覆兩層 90 度單方向之碳纖維貼片，放置兩個田字型梁構件。本研究組合式梁-版系統試體共規劃四組，如表 4 所示。

表 3 組合式 FRP 梁試體規劃表

試體編號	試體斷面示意圖	貼覆碳纖維		填充物	長度(m)
		層數	方向		
BR		—	—	矩形 GFRP 管	1
BRE		—	—	矩形 GFRP 管及 環氧樹脂砂漿	1
S2C		2	90°	—	1
		—	—		1
S4C		2	90°	—	1
					2

表 4 組合式 FRP 梁-版系統試體規劃表

試體編號	試體斷面示意圖	長度(m)
BPP		1
BRP		1
BREP		1
S4P		1

使用 100 噸萬能試驗機進行三點抗彎試驗。所有試驗型式採用簡支承型式，其兩側簡支承反力座置於試體下方距兩端各 5 公分處，試體跨距中央上方處施加一線集中載重，並架設位移計於試體下方中點處(如圖 2 所示)，以便量測中點撓度之位移。

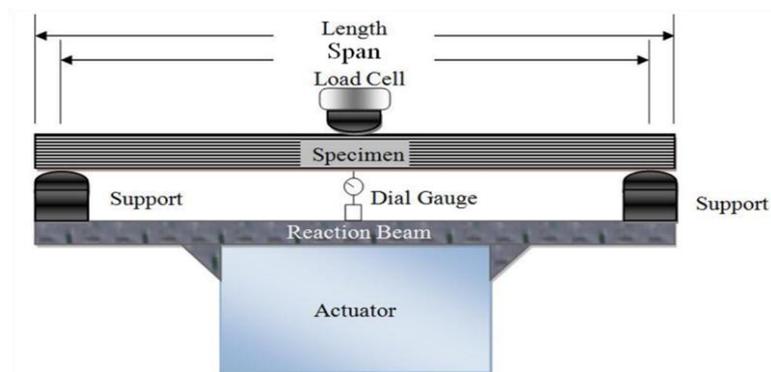


圖 2 三點抗彎試驗試體示意圖

伍、試驗結果

由三點抗彎試驗結果，分別探討 GFRP 組合梁構件，以及組合式 GFRP 梁-版系統的極限強度、破壞模式等力學行為。

一、GFRP 組合梁構三點抗彎試驗結果

本文進行的組合梁三點抗彎試驗，分別有 BR、BRE、S2C 與 S4C 等四種試體。其中 BR 梁試體之勁度與雙層腹版 I 型梁相近，極限量為 9.04 kN 為雙腹版 I 型梁之 1.06 倍。因為 BR 型式的組合梁於極限載重作用時，其破壞模式與雙腹版 I 梁的破壞模式相同，皆於上翼版處發生局部挫屈破壞。BRE 組合梁試體於三點抗彎試驗時，分別為 101.55 kN 和 103.19 kN 達極限載重，上翼版基材壓碎，此時 BRE 組合梁試體對應下翼版的中點位移分別為 1.2697 cm 和 1.3409 cm。

S2C 斷面的組合梁試體，分別進行 1 m 與 2 m 兩種跨度之三點抗彎試驗，跨度為 1 m 的 S2C 組合梁試體(S2C1)載重於 25.69 kN 達極限載重，試體於上翼版載重施加處發生基材壓碎破壞，此時對應的最大向下位移為 0.5009 cm；跨度為 2 m 的 S2C 組合梁試體(S2C2)載重於 4.25 kN 時達極限載重，試體於上翼版載重施加處發生基材壓碎破壞，此時對應的最大向下位移為 2.610 cm。S4C 斷面的組合梁試體，亦分別進行 1 m 與 2 m 兩種跨度之三點抗彎試驗。跨度為 1 m 的 S4C 組合梁試體(S4C1)載重於 76.29 kN 時達極限載重，試體於上翼版載重施加處發生基材壓碎破壞，此時對應的最大向下位移為 0.8689 cm；跨度為 2 m 的 S4C 組合梁試體(S4C2)載重於 53.66 kN 時達極限載重，試體於上翼版載重施加處發生基材壓碎破壞，此時對應的最大向下位移為 2.81 cm。

同時透過梁構件彎曲應力公式解(如式(4)所示)與試驗結果，探討各種組合式 FRP 梁斷面於三點抗彎載重作用下之破壞模式。當三點抗彎試驗得到之極限載重($P_{\text{實驗值}}$)接近或等於計算強度($P_{\text{理論值}}$)時說明該型式之組合梁斷面破壞模式為梁底纖維拉斷；若極限載重($P_{\text{實驗值}}$)小於計算強度($P_{\text{理論值}}$)則該型式之組合梁斷面破壞模式為載重施加處局部壓碎破壞。各組合式 FRP 梁構件於三點抗彎試驗之破壞模式皆為載重施加處局部壓碎破壞，如表 5 所示。

$$\sigma = \frac{MY}{I} \quad (4)$$

各組合式 FRP 梁構件試體極限載種與破壞模式之比較如表 5 所示，各組合式 FRP 梁構件試體極限載重作用下的破壞照片則如圖 3 所示，各組合式 FRP 梁構件的力-位移關係圖則如圖 4 所示。

表 5 組合式 FRP 梁試體破壞模式比較表

試體編號	I(cm ⁴)	Y(cm)	L(cm)	P _{理論值} (kN)	P _{實驗值} (kN)	破壞方式 (結果)
BR	879.9	7.62	90	106.23	9.04	A
BRE	933	7.62	90	112.46	101.55	A
S2C1	655.2	7.62	90	79.06	25.69	A
S2C2	655.2	7.62	90	79.06	4.25	A
S4C1	1310.4	7.62	90	158.21	76.29	A
S4C2	1310.4	7.62	90	158.21	53.66	A

破壞模式 A: 施力處局部壓碎, B: 梁底纖維拉斷

試體編號	破壞模式	破壞情形	破壞照片
BR	A		
BRE	A		
S2C	A		
S4C	A		

破壞模式 A: 施力處局部壓碎, B: 梁底纖維拉斷

圖 3 各型式 GFRP 組合梁之破壞模式照片

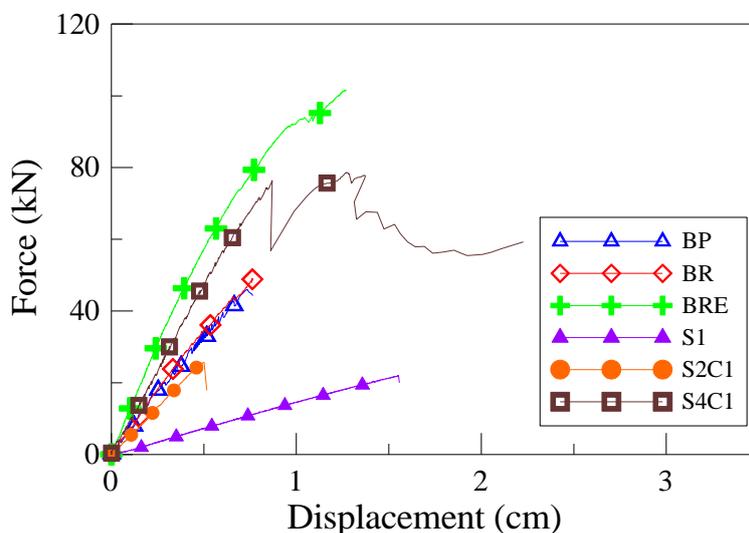


圖 4 組合式 GFRP 梁構件之力-位移關係圖

二、組合式 GFRP 梁-版系統三點抗彎試驗結果

組合式 GFRP 梁-版系統的三點抗彎試驗，分別有 BPP、BRP、BREP 與 S4P 等四種試體，進行三點抗彎試驗，試體的跨度為 1 m。其中 BPP 之梁-版系統三點抗彎試驗，載重施加至 154.24 kN 時達極限載重，此時 BPP 梁-版系統對應的向下位移為 0.946 cm。其破壞模式因為雙腹版 I 型梁的腹版較薄，故發生雙腹版 I 型梁的腹版發生局部挫曲，且於梁腹版與翼版界面處沿纖維方向撕裂。BRP 組合式 FRP 梁-版系統試體於三點抗彎試驗時，載重施加至 172.51 kN 時達極限載重，此時 BRP 試體對應的最大向下位

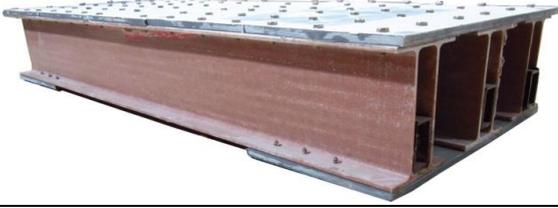
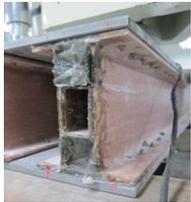
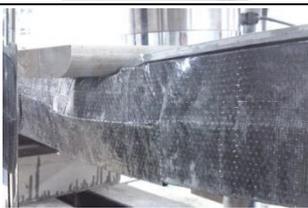
移發生於下翼版的中點處，其位移量為 0.9537 cm。其破壞模式系先發生兩側腹版與矩形管之界面脫層，當載重繼續增加達極限載重後於載重施加處發生基材局部壓碎破壞。

BREP 組合式 FRP 梁-版系統試體於三點抗彎試驗時，載重施加至 331.98 kN 時達極限載重，此時 BREP 試體對應的最大向下位移發生於下翼版的中點處，其位移量為 1.3548 cm。BREP 組合式梁-版系統因為填入環氧樹脂砂漿，增加 BREP 試體的勁度，且延遲載重施加處的基材壓碎，使得 BREP 試體之極限強度與勁度有明顯的提升。該梁-版系統之破壞係於載重施加的過程先將填充的環氧樹脂砂漿擠出，導致力量無法由受壓力側傳遞至受拉側，最終造成載重施加處的基材局部壓碎。S4P 組合式 FRP 梁-版系統試體於三點抗彎試驗時，載重施加至 187.41 kN 時達極限載重，此時 S4P 試體對應的最大向下位移發生於下翼版的中點處，其位移量為 1.09 cm。由於 S4P 試體各方管構件因為塗布環氧樹脂而有良好膠結能力，加上外側貼覆 90 度方向纖維貼片，提供田字型梁構件之圍束力。可使 S4P 梁-版系統之極限強度可以達到 187.41 kN。但當載重持續增加時，於載重施加處發生基材局部壓碎破壞。

各組合式 GFRP 梁-版系統的極限載重與破壞模式如表 6 所示，各試體於極限載重作用下的破壞照片與對應的力-位移關係圖，如圖 5 與圖 6 所示。

表 6 組合式 FRP 梁-版系統試體極限強度與破壞模式

試體編號	強度(kN)	破壞模式
BPP	154.24	施力處局部壓碎且梁腹版局部挫屈
BRP	172.51	施力處局部壓碎且矩形管脫層
BREP	331.98	施力處局部壓碎且環氧樹脂砂漿分離
S4P	187.41	施力處局部壓碎且腹版隆起、纖維脫層

試體編號	破壞模式	破壞情形	破壞照片
BPP	A、B		
BRP	A、C		
BREP	A、D		
S4P	A、E		

破壞模式 A: 壓力側局部壓碎、B: 腹版局部挫屈、C: 矩形管脫層、D: 環氧樹脂砂漿分離、E: 纖維脫層

圖 5 組合式梁-版系統試體破壞模式照片

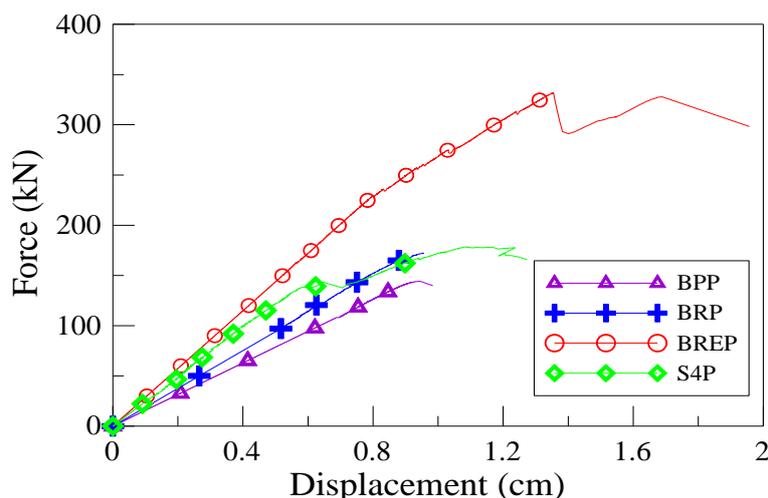


圖 6 組合式 GFRP 梁-版系統之力-位移關係圖

陸、理論解與有限元素分析

本研究分別使用理論解(精確解)探討組合式 GFRP 梁三點抗彎試驗之結果，以及使用有限元素分析的方式，探討組合式 GFRP 梁-版系統三點抗彎試驗結果，藉由試驗結果證明理論解與有限元素分析的正確性。

一、理論解

使用 Euler 和 Timoshenko 三點抗彎梁理論公式，計算雙腹版 I 形梁(DWB)構件內部增加矩形管及局部填充環氧樹脂砂漿梁試體(BRE)兩型式組合梁構件載重與向下變形的關係，並將計算與試驗結果比較。

分別將雙腹版 I 形梁構件及環氧樹脂砂漿之彈性模數、泊松比及剪力模數相關參數，透過斷面轉換之方式，代入三點抗彎梁理論公式中進行計算。其中，雙腹版 I 形梁之相關參數由廠商所提供(如表 7 所示)，局部填充相關參數為藉由環氧樹脂砂漿抗壓實驗所得(如表 8 所示)。

表 7 組合式 GFRP 梁構件之材料參數

彈性模數 E (MPa)	泊松比 ν	剪力模數 G (MPa)
$E_x = 6,621$	$\nu_{xy} = 0.33$	$G_{xy} = 3,724$
$E_y = 6,621$	$\nu_{yz} = 0.038$	$G_{yz} = 3,724$
$E_z = 20,690$	$\nu_{xz} = 0.038$	$G_{xz} = 3,724$

表 8 環氧樹脂砂漿之材料性質

彈性模數 E (MPa)	泊松比 ν	剪力模數 G (MPa)
1721.6	0.33	647.22

利用轉換斷面的方法，將上述 GFRP 構件及環氧樹脂砂漿的材料性質分別代入三點抗彎變位公式。根據 Schniepp 等人(2002)提出 FRP 構件跨深比介於 6~10，其構件造成的剪力變形影響較大[13]。而本研究雙腹版 I 形梁之跨深比為 6.56 故需要將彎曲及剪力造成的變形一併考慮及計算。

式(4)中， P 及 δ 分別為實驗過程中線性段範圍內之加載力量及中點位移； L 為試體之淨跨距 90 cm。 I 為試體斷面之慣性矩，慣性矩依據試體情況改變，試體為複合材料，則需以斷面轉換方式求出慣性矩。 G 為線彈性材料之剪力模數，計算式如式(5)。 A 為梁構件之截面積。 k 為剪力修正係數，係泊松比相關函數與構件斷面有關，如式(6)所示。

$$\delta = P \times \left(\frac{L^3}{48EI} + \frac{L}{4kGA} \right) \quad (4)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

$$k = \frac{10(1+\nu)(1+3m)^2}{(12+72m+150m^2+90m^3) + \nu(11+66m+135m^2+90m^3) + 30n^2(m+m^2) + 5\nu n^2(8m+9m^2)} \quad (6)$$

其中: $m = \frac{2bt_{\text{flang}}}{ht_{\text{web}}}$, $n = \frac{b}{h}$, b 翼版寬度、 t_{flang} 翼版厚度、 h 腹版寬度、 t_{web} 腹版厚度

其中雙腹版 I 形梁(BP)及內部增加矩形管(BR)組合梁構件長度均為 1 m 淨跨度均為 90 cm, 此二種斷面型式之構件, 於載重施加後得到的力與位移圖如圖 7 所示。由此力與位移圖得知 BP 梁與 BR 梁的勁度相近, 原因是 BR 梁的矩形管與雙腹版 I 形梁是由樹脂黏合, 當 BR 梁受力初始階段梁腹版會因為受力變形而向兩側鼓起, 導致矩形管與雙腹版 I 形梁之腹版分離, 使得 BR 梁與 BP 梁勁度相似。故組合梁的論解僅針對雙腹版 I 型梁, 梁內增加矩形管並內填樹脂砂漿之 BRE 試體進行理論值計算。

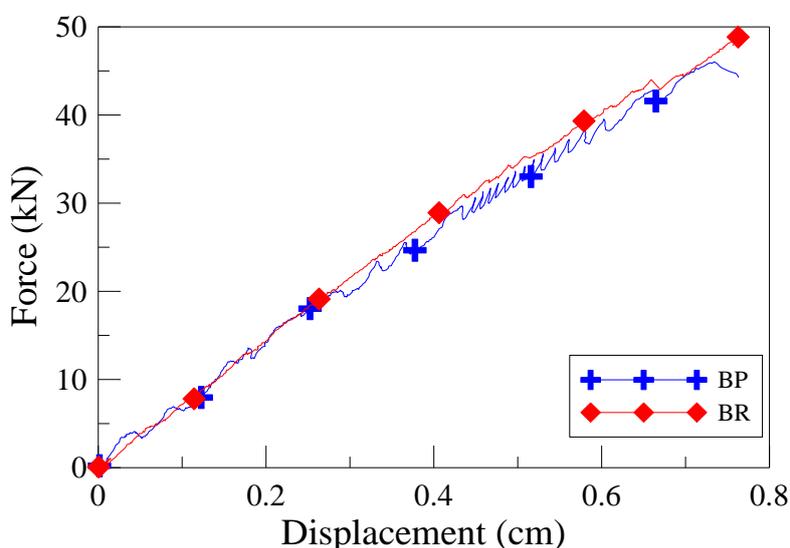


圖 7 BP 及 BR 梁構件受彎矩及剪力變形之力-位移關係圖

BRE 組合梁構件實驗結果可知局部填充環氧樹脂砂漿與 GFRP 構件界面之膠結性佳, 且 BRE 梁試體之跨深比介於 6~10 之間, 載重施加時會受到剪力影響, 若不考慮剪力影響使用 Euler 梁理論分析 BRE 組合梁其誤差為 39.76%。故理論分析採用斷面轉換及 Timoshenko 三點抗彎梁理論進行計算。BRE 梁試體理論分析與實驗結果之力-位移關係圖, 如圖 8 所示。比較理論分析與實驗結果之勁度, 如表 9 所示, 勁度誤差為 12.69%。

表 9 BRE 理論計算與實驗結果比較表

試體	線性段 K (kN/cm)	誤差 (%)
BRE	107.25	—
BRE (Euler)	149.9	39.76
BRE (Timoshenko)	95.17	12.69

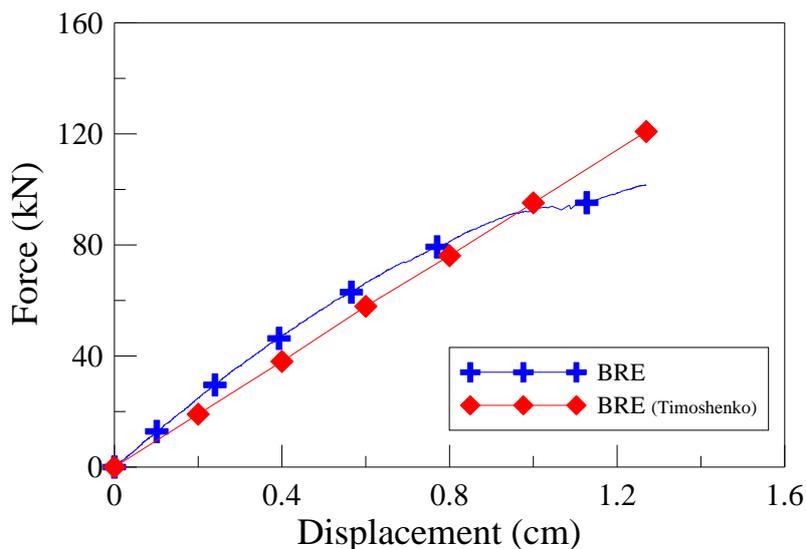


圖 8 BRE 理論計算與實驗之力-位移關係圖

二、有限元素分析

以有限元素分析軟體 ANSYS 選擇 Solid 45 元素，進行組合式 GFRP 梁-版系統之有限元素模擬。材料之彈性模數、泊松比及剪力模數等材料參數，則是依據廠商所提供之 GFRP 材料參數(如表 10 所示)。

表 10 GFRP 材料參數

彈性模數 E (MPa)	泊松比 ν	剪力模數 G (MPa)
$E_x = 6,621$	$\nu_{xy} = 0.33$	$G_{xy} = 3,724$
$E_y = 6,621$	$\nu_{yz} = 0.038$	$G_{yz} = 3,724$
$E_z = 20,690$	$\nu_{xz} = 0.038$	$G_{xz} = 3,724$

依據試驗實際情形進行 GFRP 梁-版系統的邊界條件設定，比照三點抗彎試驗的簡支承位置設定，分別於模型兩端各內縮 5 公分處，一端設定束制 y 方向之變位，使試體無法上下移動來模擬輻支承；另一端設定鉸支承，即束制 x 、 y 方向之變位，並於有限元素模型上翼版中央點 50 公分處，以 y 軸向下做位移控制。BPP、BRP 與 S4P 等三種 GFRP 梁-版系統的有限元素模型，及其邊界條件設定如圖 9 所示。

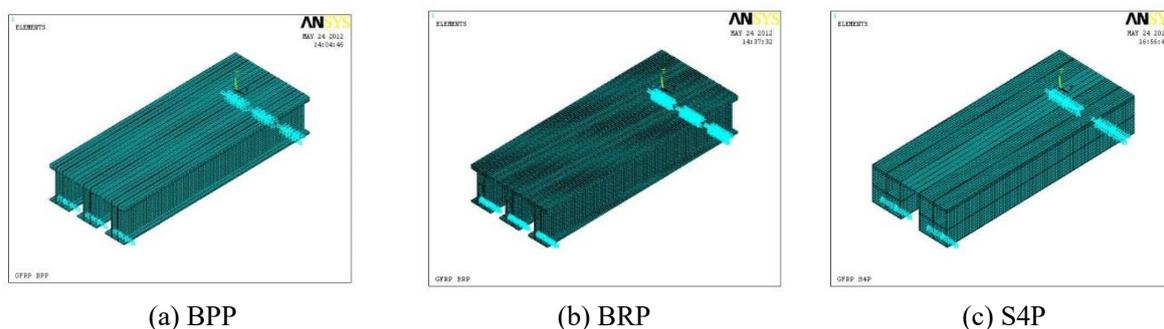


圖 9 組合式 GFRP 梁-版系統有限元素模型

其中 BPP 組合梁 Y 方向之垂直應變、 Z 方向之軸力、剪應力及其等效應力(von mises stress)如圖 10 所示。BRP 組合梁 Y 方向之垂直應變、 Z 方向之軸力、剪應力及其等效應力(von mises stress)如圖 11 所示。S4P 組合梁 Y 方向之垂直應變、 Z 方向之軸力、剪應力及其等效應力(von mises stress)則如圖 12 所示。

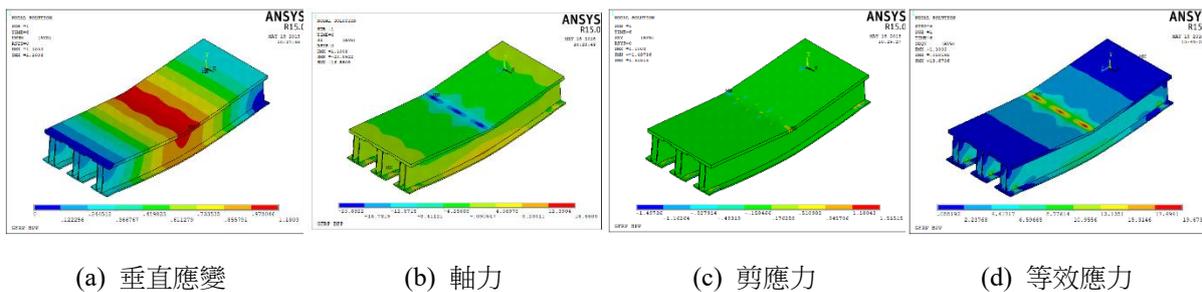


圖 10 BPP 組合梁分析結果等高線圖

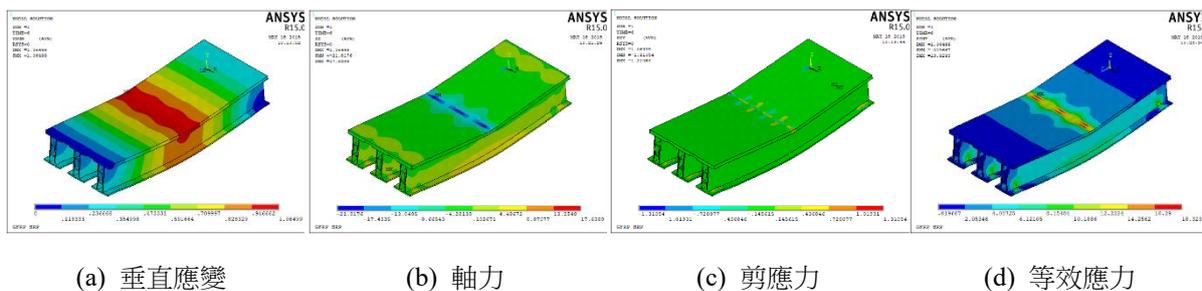


圖 11 BRP 組合梁分析結果等高線圖

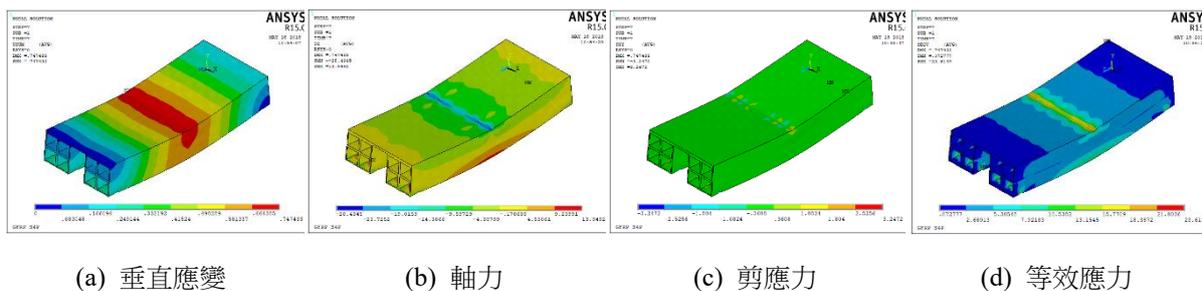


圖 12 B4P 組合梁分析結果等高線圖

組合式 GFRP 梁-版系統的有限元素分析與 GFRP 梁-版系統三點抗彎試驗得到的力 - 位移圖如圖 10 所示。比較試驗與分析的力 - 位移關係，得知於線性段範圍試驗結果與分析值接近，誤差值皆小於 10%，如圖 13 所示。但 GFRP 梁-版系統三點抗彎試驗，極限載重作用下均發生基材的局部壓碎破壞，故非線性段的力量加載及其對應之位移評估不易，故有限元素分析時僅考慮 GFRP 梁-版系統線性段範圍。

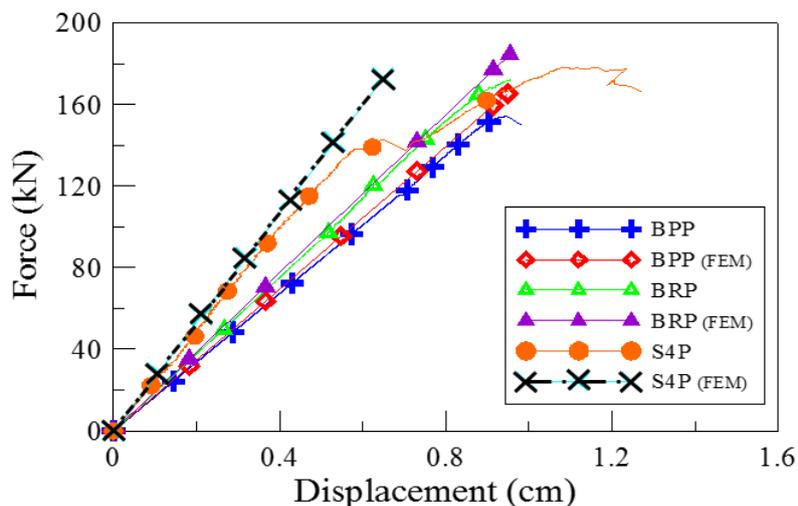


圖 13 各組合式梁-版系統分析與實驗之力-位移關係圖

表 11 各組合式梁-版系統 FEM 分析與實驗比較表

試體	線性段 K (kN/cm)	誤差 (%)
BPP	176.57	—
BPP (FEM)	184.75	4.63
BRP	188.14	—
BRP (FEM)	193.66	2.93
S4P	245.34	—
S4P (FEM)	266.55	8.65

柒、結論

本文透過試驗與分析之方式，進行組合式 GFRP 梁-版系統破壞模式探討，確保組合型式 GFRP 梁-版系統應用於公路橋梁時可以提供足夠的安全性。

實驗結果發現：拉擠成型梁構件受力量加載時，GFRP 構件易於載重施加處發生基材局部壓碎破壞。故採用的組合式 GFRP 梁構件，構件間相互膠結面積大，可使組合梁構件彎曲效能有效發揮。

方管 FRP 構件組合的日字型梁構件三點抗彎試驗得知，因膠結面不足僅上部方管梁受力剪力破壞力量無法有效傳遞；而田字型梁構件因有足夠的膠結面，使得田字型梁可以有較佳的組合構件之特性。

由各種型式之組合梁構件三點抗彎試驗結果，選用適當之組合梁構件斷面進行組合式梁-版系統試體之製作。透過組合式梁-版系統型式的設計可有效提供整體梁-版系統的強度及勁度。

理論計算時採用斷面轉換及 Timoshenko 三點抗彎梁理論進行計算，與實驗值有較近似的結果。將 GFRP 材料參數代入有限元素分析軟體 ANSYS 中，進行組合式梁-版系統之有限元素模擬。比較有限元素分析及試驗結果，得知線性段範圍內試驗與分析之力-位移關係相近，勁度誤差在 9% 以內，證實本文之有限元素模擬有一定的可靠性。

參考文獻

- [1] L. C. Bank, M. G. Oliva, H. U. Bae and B. V. Bindrich. (2010). Hybrid concrete and pultruded-plank slabs for highway and pedestrian bridges, *Construction and Building Materials*, 24, 552–558.
- [2] P. J. D. Mendes, J. A. O. Barros, J. M. Sena-Cruz and M. Taheri. (2011). Development of a pedestrian bridge with GFRP profiles and fiber reinforced self-compacting concrete deck, *Composite Structures*, 93, 2969–2982.
- [3] H.-S. Ji, J. K. Byun, C.-S. Lee, B.-J. Son and Z.-J. Ma. (2011). Structural performance of composite sandwich bridge decks with hybrid GFRP-steel core, *Composite Structures*, 93, 430–442.
- [4] R. El-Hacha and D. Chen. (2012). Behaviour of hybrid FRP-UHPC beam subjected to static flexural loading, *Composites Part B: Engineering*, 43, 582–593.
- [5] Y.-F. Li and S.-T. Kan. (2011). *A study on the three-point bending test and mechanical behavior of the hybrid FRP beam*, 2011 ICFMEIA, Bali Island, Indonesia.
- [6] 吳嘉濠 (2012)。FRP 橋面版構件於三點抗彎測試與有限元素分析之研究(碩士論文)。國立臺北科技大學土木與防災研究所，臺北市。

- [7] 陳彥鈞 (2012)。玻璃纖維強化高分子複合材料 I 型梁-版系統力學行為之研究(碩士論文)。國立臺北科技大學土木與防災研究所，臺北市。
- [8] Y.-F. Li and C.-H. Wu. (2013). *A study on the mechanical behavior of the BFRP decks with fillers*, International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies, SCMT3, Kyoto, Japan.
- [9] Y.-F. Li and C.-C. Yu (2013). *A study on the shear strength connections of FRP Components*, The 2013 Asia-Pacific International Congress on Engineering and Natural Sciences, Bangkok, Thailand.
- [10] Y.-F. Li, O. Jobe, C.-C. Yu, and Y.-T. Chiu. (2015). Experiment and analysis of bolted GFRP beam-beam connections, *Composite Structures*, 127, 480-493.
- [11] 李有豐 (2012)。FRP 複合材料於土木與建築工程之應用。臺北：臺灣區複合材料工業同業公會。
- [12] 林建中 (2007)。高分子材料科學(高分子材料機械性質)。臺北：新文京開發出版股份有限公司。
- [13] T. J. Schniepp. (2002). *Design manual development for a hybrid, FRP double-web beam and characterization of shear stiffness in FRP composite beams* (MS Thesis, Virginia Polytechnic and State University). Retrieved from: <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/34550/thesis%28corrected%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>