

GFRP版樁擋土牆應用於集水區護岸之可行性研究

陳敬凱¹、余忠政¹、李有豐²、陳俊安³、陳鶴修⁴

摘要

土工結構多數採用鋼版樁作為擋土支撐，雖然鋼版樁強度高，但是長時間接觸到地下水、氧氣與土壤中酸鹼物質，有生鏽與結構安全性堪慮之虞。為提升土工結構之耐久性與安全性，保護護岸邊坡避免遭河水淘刷與土體滑移等破壞，本文提出具高強度、質輕、耐候性佳之玻璃纖維強化高分子複合材料(Glass Fiber Reinforced Plastics, GFRP)應用於版樁擋土牆。針對GFRP版樁實尺寸構件進行三點抗彎實驗，並改變其跨度觀察其勁度之變化，輔以有限元軟體ANSYS分析其受力行為，並將實驗結果回饋至分析模型中。此外，亦找一處現地進行GFRP版樁之現地實驗，輔以有限元素軟體(PLAXIS 2D)分析其安全性，以驗證GFRP版樁應用於集水區護岸之可行性。

關鍵字：玻璃纖維強化高分子複合材料、版樁、護岸

A Study of the GFRP Anchored Sheet Pile Applied to Reservoir Basin Revetment Protection

Ching-Kai Chen¹, Chung-Cheng Yu¹, Yeou-Fong Li², Chun-An Chen³, Hao-Hsiu Chen⁴

Abstract

Most of the earth structures make use of steel sheet piles as earth retaining system, although steel sheet pile offer high strength it is subject to rust within a periods of time when in contact with groundwater, oxygen and acidic substances in the soil, which might cause damage of the structures. To improve the durability and safety of the earth structure, to protect slope revetments, to avoid river scouring, landslides and other damages, this paper presents Glass Fiber Reinforced Polymers (GFRP) composite material which is characterized by high strength, lightweight, good resistance to weathering for application sheet pile retaining walls. A three-point bending test was conducted on a full scale GFRP sheet pile, its span was then modified to observe the changes in its stiffness, and an analysis of its behavior under loading conditions with the finite element software ANSYS was performed. Then, compare the analysis results to the experimental results. The installation of the GFRP sheet piles in-situ was performed. The analysis using finite element analysis software (PLAXIS 2D) for the safety factor were conducted to verify the feasibility of the GFRP sheet piles applied to reservoir basin revetment protection.

Keywords : glass fiber reinforced plastics, sheet pile, revetment

1. 國立臺北科技大學土木工程系研究生
Master Student, Department of Civil Engineering, National Taipei University of Technology
2. 國立臺北科技大學土木工程系教授(通訊作者)
Professor, Department of Civil Engineering, National Taipei University of Technology
Corresponding Author, TEL : 02-27712171 ext. 2648; E-mail address : yfli@ntut.edu.tw
3. 艾奕康工程顧問股份有限公司 台灣區大地工程助理總監
Associate Director, Geotechnical, Taiwan, AECOM
4. 水利署北區水資源局 工程員
Engineer, Northern Region Water Resources Office

一、前言

台灣位於太平洋西部，每逢夏、秋季常有熱帶氣旋或颱風挾帶豐沛雨量，加上台灣水文條件一河川狹短、坡陡流急，每逢豪大雨或颱風侵襲，常使山坡土石崩塌、河水淘刷護岸，往往造成交通阻斷，嚴重威脅人民生命財產安全。

目前國內護岸與邊坡整治工法眾多，依不同坡度、崩塌面積與地質，採用不同之護岸邊坡工法進行整治，但受限於施工腹地不足、材料與機具運送不易等不良條件，造成工法選用受限。另外，使用於護岸邊坡之傳統整治工法材料為鋼鐵材料，然鋼鐵材料一旦鏽蝕，強度降低易造成地工結構物破壞，如圖1所示。而一般常採用的鋼筋混凝土重力式擋土牆，若趾部無有效穩固，往往遭大水淘刷與滲流掏空，擋

土牆有倒塌之虞，如圖2所示。故使用耐久性長、安全性更佳之新材料來應用於護岸邊坡或臨時的擋土結構，確有其急迫性與重要性。

本文提出具高強度、防水之玻璃纖維強化高分子複合材料(Glass Fiber Reinforced Polymers，以下簡稱GFRP材料)所製之版樁，可有效使水、土隔離並減緩河岸淘刷，避免護岸土壤流失；並對GFRP材料所製之版樁，進行實驗與數值分析模擬。此外，倘若颱風過境，護岸邊坡破壞、災區聯外道路中斷時，使用質輕之GFRP材料版樁，可搭配輕機具，使遭淘刷、破壞之道路可快速搶通，可加快進入山區救災之腳步。本文所提出之GFRP版樁應用於版樁擋土牆或臨時擋土結構，希望能供爾後設計之參考。



圖1 鋼版樁發生鏽蝕之照片



圖2 RC牆背側土壤遭淘刷照片

二、FRP材料特性介紹

一般FRP材料主要由纖維(Fiber)、基材(Matrix)所構成，纖維主要提供機械性能，最常見纖維為玻璃纖維(Glass Fiber)、碳纖維(Carbon Fiber)及玄武岩纖維(Basalt Fiber)。而基材(Matrix)最主要的功能是傳送及分散應力到每根纖維中，並使纖維固定於一定之排列方向。而纖維-基材之界面(Interface)則係決定複合材料使用壽命之重要因素[1]。

目前國內常使用鋼材、鋼筋混凝土與木材等作為邊坡護岸的選用材料，然其使用上之年限與強度仍有限。故為解決現行護岸與邊坡的使用上的限制，本文將邊坡、護岸常用的材料與FRP材料，進行各方面的比較；發現FRP材料較現行材料的耐候性、力學性能皆有良好的

表現(如圖3所示)。故本文針對質輕、高強度且耐候性佳的FRP材料版樁應用於地工結構進行適用性探討，以解決目前鋼材應用於護岸邊坡因鏽蝕導致強度下降的問題。

FRP材料應用於邊坡擋土，相較於傳統鋼材，其材料優勢分別具有高強度、輕質性、耐久性佳、可設計性以及施工便利等的優勢，FRP材料各項優勢簡述如下：

1. 高強度：

FRP複合材料之強度是由選擇的纖維與樹脂依照配比決定，故可因應使用者之不同使用需求，進行纖維與樹脂材料之配比設計與製作，使材料具較高的經濟性。如將玄武岩纖

維、碳纖維等作為選用之纖維材料，將使FRP材料具較佳之抗拉與抗彎強度，各材料之比強度及比彈性模數如表1所示。若將其製成高強度之FRP材料應用於邊坡護岸中，將可大幅提升其邊坡之穩定與安全性。

2. 質量輕：

FRP材料具輕質性，其中玻璃纖維強化高分子材料(以下簡稱GFRP)之密度約為鋼的四分之一，比強度則為鋼的十倍左右。將其應用於邊坡整治上，可加速施工時效、降低機具與人力成本、減少工期等。

3 耐久性：

相較於鋼材，FRP材料不會有鏽蝕問題，可避免因地下水或與空氣接觸，產生氧化的問題。且FRP材料具有優異的耐蝕性，不論處於酸、鹼、鹽及溫濕循環等嚴苛環境下皆可使用，各材料於不同環境的比如表2所示，FRP材料的耐候性最佳，將FRP使用於用臨海、河堤、硫磺溫泉區等大地工程建設，較傳統材料之耐久性較佳，可大幅降低生命週期成本並提升使用年限。

表1 材料比強度與比彈性模數比較

結構材料種類	比強度(σ/ρ) (MPaxcm ³ /g)	比彈性模數(E/ ρ) (GPaxcm ³ /g)
碳鋼	51.0	26.4
鋁合金	1.7	2.7
玻璃纖維	500.0	21.5
玄武岩纖維	688.6	24.0
碳纖維	1100.0	78.0

(註：構件材料之輕質性指標是將材料強度及彈性模數分別除以材料比重，稱之為比強度(σ/ρ)及比彈性模數(E/ ρ)

由上述FRP材料各特性之簡述可發現，FRP材料與既有邊坡、護岸所使用之材料，確有相當的優勢，且國外有相當多的研究與案例將其應用到護岸與邊坡擋土工程中，相關研究成果簡述如下。

Shao與Shanmugam (2002)在拉擠成型GFRP版樁之撓曲極限研究中，將GFRP版樁以及連接的複合材料版樁受到均布載重之試體進行研究，並觀察其受力後之變形、可承受的極限彎矩以及對應的破壞模式。研究發現單面FRP版

4. 可設計性：

FRP材料其設計相當靈活，可透過不同製程方式製成各式形狀之構件與型材，如製成用於錨碇之圓棒、螺紋棒、扁條狀土釘，以及製成管樁、版樁等形式，如圖4所示。

5. 施工便利性：

對FRP材料製成地錨、版樁等邊坡護岸材料進行施工，將大幅減輕運送之成本與人力，且可使用輕巧之施工機具，即能對FRP地工材料進行施工與安裝，大幅提升其便利性，進而降低工期。倘若在地勢較高處，甚至可於現地搭鷹架進行施工(如圖5所示)。

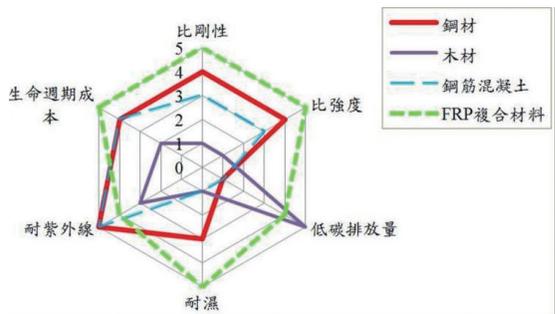


圖3 FRP材料與各式材料比較

表2 FRP與各種材質於不同環境比較表^[2]

藥液種類	耐蝕性FRP	低碳鋼	不鏽鋼	鋁
硫酸	○	×	○	×
鹽酸	○	×	×	×
磷酸	○	×	○	×
鹽化合物	○	×	×	×

註：○表示佳；×表示不佳

樁的承載能力，比三面版樁連接在一起承受之彎矩强度高15%以上，而破壞模式係由於其版樁與版樁間之連接較脆弱處先破壞[4]。Tan 與 Paikowsky (2008)在GFRP版樁在泥土中受力行為研究，將GFRP版樁在土壤中，進行為期兩年之受力行為研究，發現在土壓力分布與經典朗肯土壓力模型幾乎一致；無發現因土壤潛變所產生版樁之明顯位移；因土壤擾動而使複合材料版樁發生最大之撓度約為總長度之0.8%；因受到3-10 kPa之土壓力，使得版樁拱起 [5]。

維、碳纖維等作為選用之纖維材料，將使FRP材料具較佳之抗拉與抗彎強度，各材料之比強度及比彈性模數如表1所示。若將其製成高強度之FRP材料應用於邊坡護岸中，將可大幅提升其邊坡之穩定與安全性。

2. 質量輕：

FRP材料具輕質性，其中玻璃纖維強化高分子材料(以下簡稱GFRP)之密度約為鋼的四分之一，比強度則為鋼的十倍左右。將其應用於邊坡整治上，可加速施工時效、降低機具與人力成本、減少工期等。

3 耐久性：

相較於鋼材，FRP材料不會有鏽蝕問題，可避免因地下水或與空氣接觸，產生氧化的問題。且FRP材料具有優異的耐蝕性，不論處於酸、鹼、鹽及溫濕循環等嚴苛環境下皆可使用，各材料於不同環境的比如表2所示，FRP材料的耐候性最佳，將FRP使用於用臨海、河堤、硫磺溫泉區等大地工程建設，較傳統材料之耐久性較佳，可大幅降低生命週期成本並提升使用年限。

表1 材料比強度與比彈性模數比較

結構材料種類	比強度(σ/ρ) (MPaxcm ³ /g)	比彈性模數(E/ ρ) (GPaxcm ³ /g)
碳鋼	51.0	26.4
鋁合金	1.7	2.7
玻璃纖維	500.0	21.5
玄武岩纖維	688.6	24.0
碳纖維	1100.0	78.0

(註：構件材料之輕質性指標是將材料強度及彈性模數分別除以材料比重，稱之為比強度(σ/ρ)及比彈性模數(E/ ρ)

由上述FRP材料各特性之簡述可發現，FRP材料與既有邊坡、護岸所使用之材料，確有相當的優勢，且國外有相當多的研究與案例將其應用到護岸與邊坡擋土工程中，相關研究成果簡述如下。

Shao與Shanmugam (2002)在拉擠成型GFRP版樁之撓曲極限研究中，將GFRP版樁以及連接的複合材料版樁受到均布載重之試體進行研究，並觀察其受力後之變形、可承受的極限彎矩以及對應的破壞模式。研究發現單面FRP版

4. 可設計性：

FRP材料其設計相當靈活，可透過不同製程方式製成各式形狀之構件與型材，如製成用於錨碇之圓棒、螺紋棒、扁條狀土釘，以及製成管樁、版樁等形式，如圖4所示。

5. 施工便利性：

對FRP材料製成地錨、版樁等邊坡護岸材料進行施工，將大幅減輕運送之成本與人力，且可使用輕巧之施工機具，即能對FRP地工材料進行施工與安裝，大幅提升其便利性，進而降低工期。倘若在地勢較高處，甚至可於現地搭鷹架進行施工(如圖5所示)。

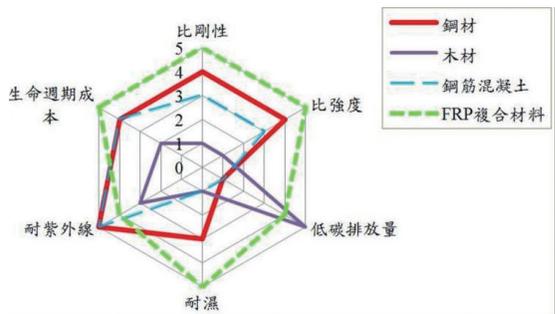


圖3 FRP材料與各式材料比較

表2 FRP與各種材質於不同環境比較表^[2]

藥液種類	耐蝕性FRP	低碳鋼	不鏽鋼	鋁
硫酸	○	×	○	×
鹽酸	○	×	×	×
磷酸	○	×	○	×
鹽化合物	○	×	×	×

註：○表示佳；×表示不佳

樁的承載能力，比三面版樁連接在一起承受之彎矩强度高15%以上，而破壞模式係由於其版樁與版樁間之連接較脆弱處先破壞[4]。Tan 與 Paikowsky (2008)在GFRP版樁在泥土中受力行為研究，將GFRP版樁在土壤中，進行為期兩年之受力行為研究，發現在土壓力分布與經典朗肯土壓力模型幾乎一致；無發現因土壤潛變所產生版樁之明顯位移；因土壤擾動而使複合材料版樁發生最大之撓度約為總長度之0.8%；因受到3-10 kPa之土壓力，使得版樁拱起 [5]。

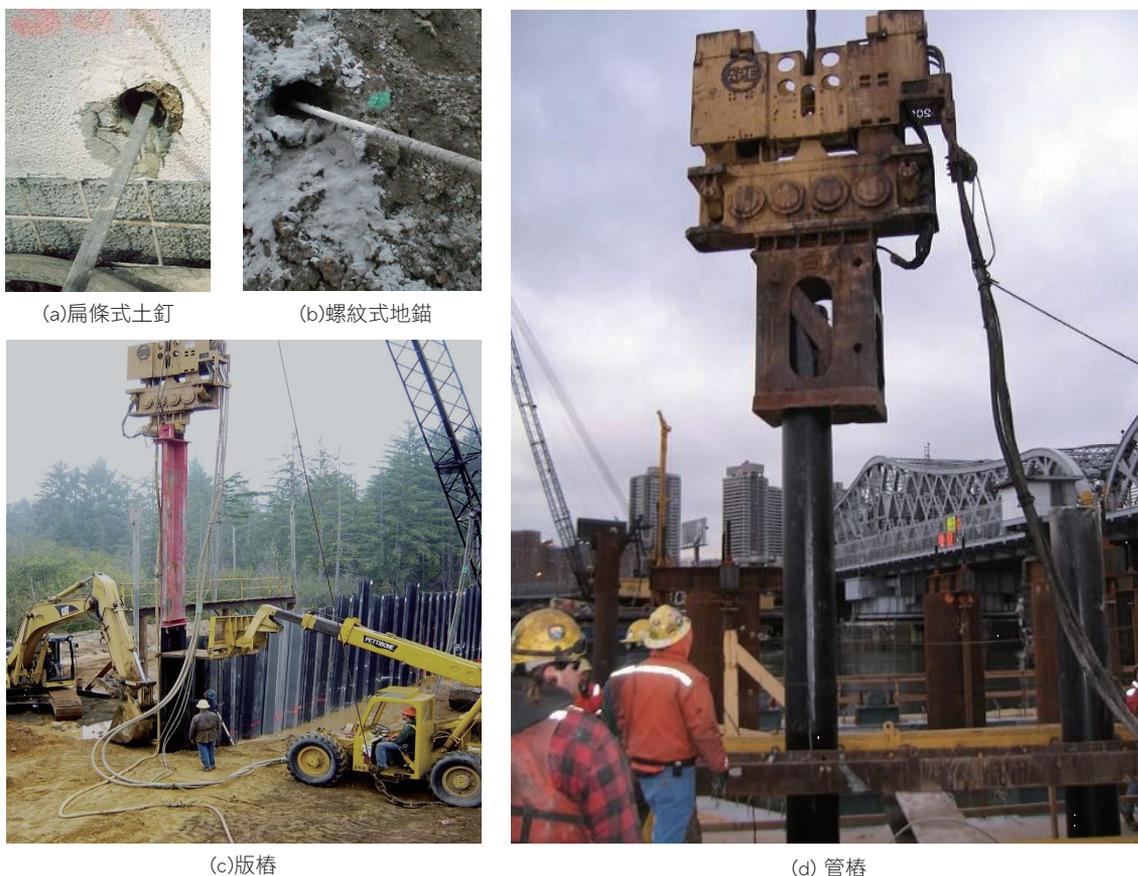


圖4 FRP材料於不同形式之地工應用[3]
 (http://www.sireg.it/eng/geotechnics_civil_engineering.htm)



圖5 FRP材料施工便利性[3]
 (http://www.sireg.it/eng/geotechnics_civil_engineering.htm)

Giosu (2011)在GFRP版樁應用於護岸之動態響應分析研究中，介紹拉擠成型的9 m長GFRP版樁，與模擬之鋼版樁及增加剛度減少彎曲變

形之新GFRP幾何體互相比較。研究結果發現，GFRP版樁可使用與鋼版樁相同的打樁鑽機和安裝施工程序[6]。

五、GFRP版樁場址環境數值分析模擬

場址選擇位於桃園縣大溪鎮石門水庫集水區之浦仔溝，位置如圖9所示。浦仔溝原屬於野溪型態，採用河道治理及河道整理方式完成整治。場址為里程3k+950附加勁土護坡，因趾部滑動產生隆起與護坡坍塌現象，現況照片如圖10；原有加勁護坡設計斷面如圖11所示。

場址所在為南莊層砂頁岩層表面之風化覆土層，地質構造上雖有褶皺構造但不致影響護岸結構。鄰近溝段渠底時部份可見露岩，經現

場鑽探確認地層分布大致如下。

1. 地表面至地下4.7m：棕黃灰色砂土夾岩屑，砂土土層厚度約3~4m，標準貫入值為5~10。
2. 地下4.7~8.1m：棕灰色砂土夾岩塊，標準貫入值為21~31。
3. 地下8.1 m以下：灰色砂岩，標準貫入值大於50。



圖9 浦仔溝試驗場址位置圖



圖10 浦仔溝現地試驗場址原況照片

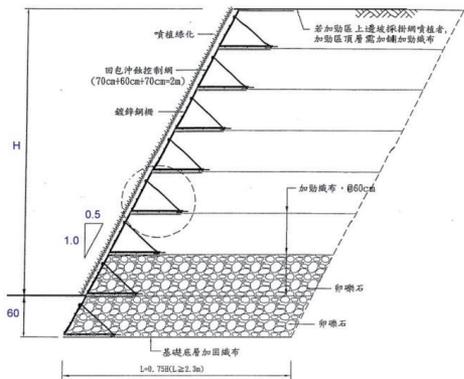


圖11 浦仔溝現地試驗場址原護岸設計圖

5.1 浦仔溝現地施作設計

浦仔溝現地施作標準斷面圖如圖12所示，GFRP版樁採用Z字型排列打設，如圖13所示。為強化GFRP版樁間連結性，於樁頂以玻纖塑木角材作為頂部繫梁連結。

5.2 浦仔溝GFRP版樁護岸之有限元素數值模擬

為確認現地施作場址之既有護岸破壞機制與瞭解護岸之力學行為，本文採用地盤與壁體變位互制行為模式進行數值模擬，以了解護岸受力情形與護岸邊坡穩定性。對於土體內應力

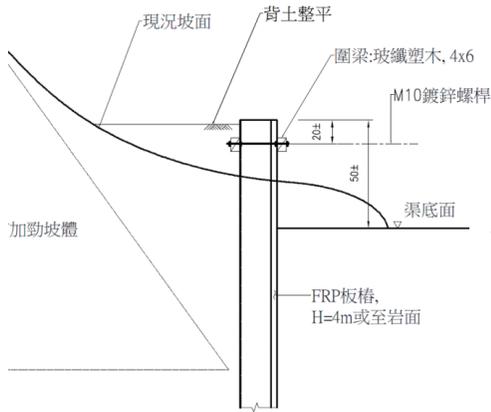


圖12 滴仔溝現地施作標準斷面圖

分布採用二向度有限元素分析軟體(PLAXIS 2D)進行護岸結構與土體間之互制行為分析模擬。除求得潛在滑動面位置外,亦採用參數折減法得到護岸穩定之安全係數。參酌現地鑽探資料,基地內各地層之分析力學參數設定如表3所示。

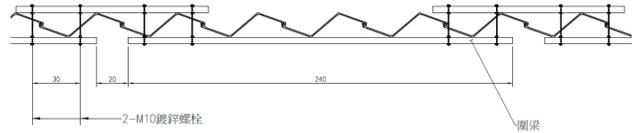


圖13 滴仔溝現地施作GFRP板樁俯視圖

表3 滴仔溝場址試驗數值分析參數表

地層	分類	說明	單位重		滲透係數		模式		力學參數				
			γ_m	γ_{sat}	k_x	k_y	組成律	排水	E	v	c'	ϕ'	ψ'
			kN/m ²	kN/m ²	m/day	m/day			kN/m ²		kN/m ²	°	°
護岸上部	SM	加勁土層(原土)	18.6	19.0	5.00	5.00	M-C	D	9.72E+04	0.33	81	28	0
護岸底部	SM	加勁土層(級配)	18.6	19.0	100.00	100.00	M-C	D	1.00E+04	0.3	81	30	0
表土層	SM/GP	棕黃灰色砂土	18.6	19.0	5.00	5.00	M-C	D	4.00E+03	0.33	5	28	0
砂岩/頁岩	SS/SH	南莊層	20.6	21.2	0.01	0.09	M-C	D	4.91E+05	0.25	491	32	2

註: 1. 組成律: M-C 表示Mohr-Coulomb 彈性-塑性模式, E是彈性體模式
 2. 排水條件 D:排水, UD:不排水
 3. 力學參數: E:彈性模數 v:泊森比
 c':內凝聚力 ϕ' :內摩擦角 ψ' :鼓脹角

圖14為數值分析模型圖,圖15為模擬原設計斷面之土體位移結果;由原設計條件計算護岸常時穩定安全係數(Safety Factor, S.F.)為1.67,依據建築物基礎構造設計規範[8],符合規範要求安全係數大於1.5之要求。圖15顯示護岸坡體具有趾部隆起之潛勢,當安全係數足夠時,此變形之發生並不明顯。當護岸趾部因土壤浸水軟化流失時,則坡體之變形即逐漸擴

大。此分析例假設趾部前側土壤流失後,如圖16,分析安全係數即降至1.40,低於規範1.5之要求值。

若採用GFRP板樁打設於坡體趾部進行補強,防止加勁牆體趾側土壤流失,提昇護岸邊坡的穩定性,如圖17所示。經試驗分析結果,其值為1.54,安全係數大於1.5,符合規範要求。

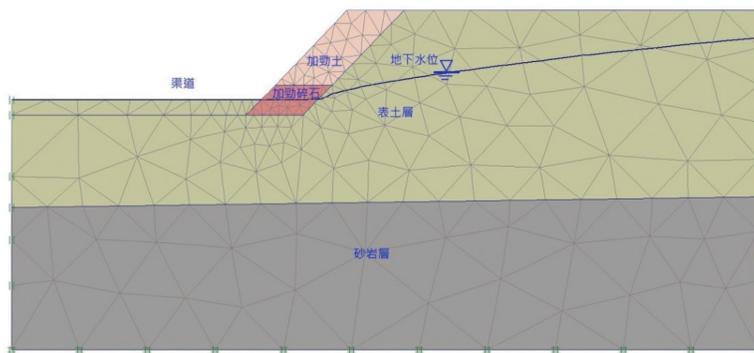


圖14 場址數值分析模型圖

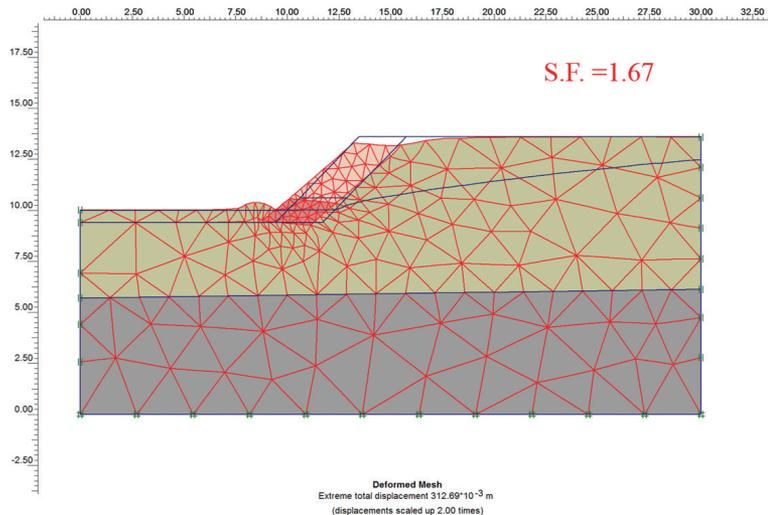


圖15 原設計場址分析土體位移圖

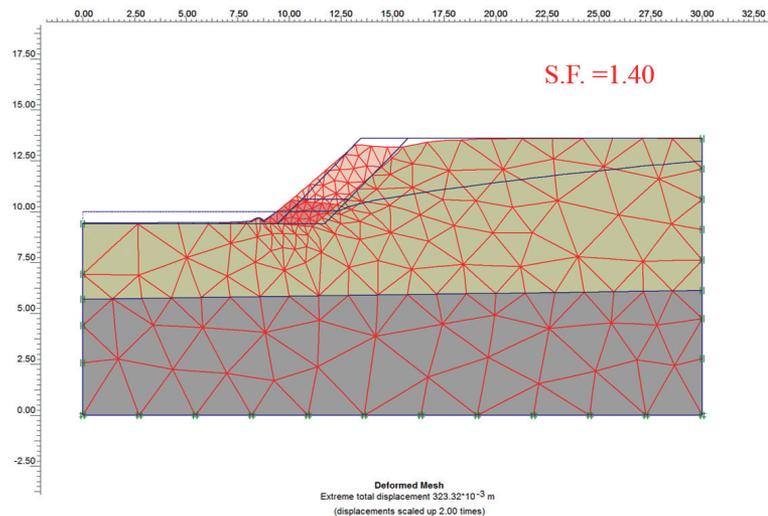


圖16 場址淘刷後邊坡滑動圖

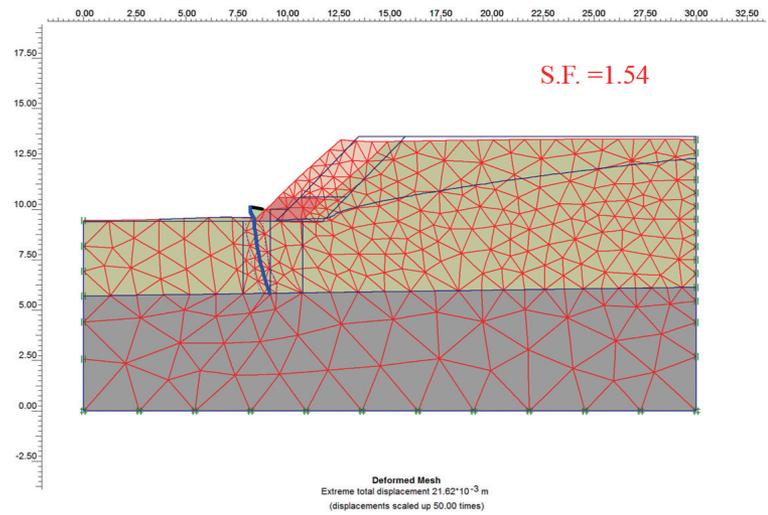


圖17 場址淘刷後打設GFRP版樁抑制趾部滑動圖(有故意放大側向變形)

六、滿仔溝現地施作過程

現地施作採用PC-200型挖土機搭配40馬力油壓驅動震動機進行施打(如圖 18、19與20所示)。打設過程說明如下：

1. 打設效率與一般鋼版樁並無差異，以本場址砂性土層而言，震動貫入速率約每分鐘3~6 m。
2. 貫入3~4m時，GFRP版樁震動變得較為短促，開始使用怪手吊臂略加壓持續施作30秒，貫入深度不再增加。再加壓時樁頭因用力過大時略有異音。研判此時已確時抵達岩盤面，爾後操作以此為貫入控制標準。
3. GFRP版樁橫向及扭轉勁度較低，震動機夾頭因其自重約2噸，若採用水平夾樁再揚起，GFRP版樁因震動機頭偏轉產生扭力時，對GFRP版樁頭部可能造成損傷，且GFRP版樁質輕，故建議採人力立樁即可，再由上方嵌合方式即可快速施作。
4. GFRP版樁入樁較鋼版樁緊密，水流幾乎不會由接縫穿透，阻水效果佳。
5. GFRP版樁材料質輕可以人力現場運搬且裁切方便，甚至可以小型砂輪機於打設完成後配合地形修整樁頭高度。

施打平面長度約31m長之GFRP版樁，施作完工如圖21所示。作業完成後進行帽梁鎖固、版樁修整、背土整理與場地復原作業。完成後進行監測儀器安裝及持續監測，監測儀器安裝位置如圖22所示，傾斜儀安裝如圖23所示。



圖18 以人力搬運GFRP版樁嵌入震動打樁機夾頭照



圖19 GFRP版樁安樁入樁與打樁照



圖20 滿仔溝GFRP版樁現地裁切作業照片



圖21 滴仔溝GFRP版樁打設完成照片

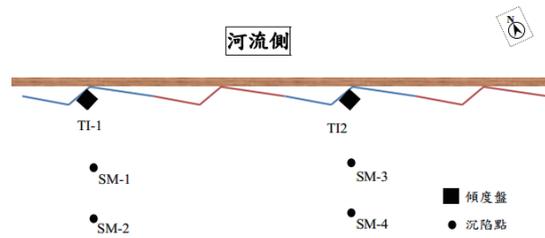


圖22 監測儀器安裝位置示意圖



圖23 傾斜儀安裝圖

七、結論

本文首先藉由三點抗彎試驗驗證其版樁勁度(EI 值)，取其值進行有限元素軟體ANSYS分析，並探討GFRP版樁構件之線性段力學行為；選定滴仔溝作為現地施作地點。並以PLAXIS 2D軟體分析，了解GFRP版樁打設之安全與可行性，經GFRP版樁打設後之護岸其安全係數大於1.5。在現地之GFRP版樁打設過程發現其材料不僅質輕、强度高、耐久性佳且極具施工優勢，可供爾後邊坡護岸設計者參考。提出以下四點結論。

1. 由實驗結果發現，在跨深比18之GFRP版樁，據Euler梁公式可有效預測其中心點之位

移；而據有限元分析軟體可有效模擬其受力後之變形。

2. 據有限元素分析結果，滴仔溝場址施作GFRP版樁之安全係數為1.54，依據建築物基礎構造設計規範，符合安全係數需大於1.5之規定。
3. 經現地試作試驗結果，GFRP版樁可適用打設於SPT-N值30之土層，並可運用一般鋼版樁打設機具施工、施工效率快。
4. 該材質具有質輕、不鏽蝕、高強度且水密性佳之特性，施工安全便利。可供做為長期擋土結構或作為臨時救災擋土之使用。

參考文獻

1. 李有豐，FRP複合材料於土木與建築工程之應用，台灣區複合材料工業同業公會，台北，2012。
3. http://www.sireg.it/eng/geotechnics_civil_engineering.htm
4. Shao, Y. and Shanmugam, J. “Moment Capacities and Deflection Limits of GFRP,” *Journal of Composites for Construction*, Vol. 10(6), pp. 520-528 (2002).
5. Tan, Y. and Paikowsky, S. G. “Performance of Sheet Pile Wall in Peat,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, No. 134, pp. 445-458 (2008).
6. Giosu , B., Toby, M. and Salvatore, R. “Dynamic Response of a Sheet Pile of Fiber-Reinforced Polymer for Waterfront Barriers,” *Journal of Composites for Construction*, Vol. 15(6), pp. 974-984 (2011).
7. 陳敬凱，GFRP錨碇式版樁擋土牆之研究，碩士論文，國立臺北科技大學土木系，2014。
8. 建築物基礎構造設計規範，民國90年10月02日。

收稿: 2015/02/02

接受: 2015/04/24