0206地震花蓮港震陷與土壤液化勘查

許尚逸 楊炫智 盧志杰 黃郁惟 劉佳泓 國家地震工程研究中心

國立成功大學土木工程學系

黃俊鴻

國立中央大學土木工程學系

摘要

本文主要報導0206地震花蓮港碼頭後線因液化產生之震陷現象,並摘要說明花蓮市其他液 化地點的勘災結果。勘災過程亦取回液化噴出物進行物理指數性質試驗,了解噴出物的性質。 勘災結果顯示花蓮港沉箱碼頭並無明顯震後變形或受損,惟後線大顆粒砂礫回填土區域產生明 顯液化震陷,值得重視。花蓮市之液化現象局部零星,未產生液化引致之災情,顯示花蓮之地 質沉積環境較不容易發生液化,液化噴出物之平均粒徑較集集地震西部平原液化噴出物為大。

關鍵字:花蓮港、華西路、液化、沉陷、噴砂口、粒徑分布。

The Reconnaissance on Seismic Settlement of Hualien Harbor and Soil Liquefactions in the 0206 Hualien Earthquake

Shnag-Yi Hsu Hsuan-Chih Yang Chih-Chieh Lu Yu-Wei Hwang Chia-Hung Liu National Center for Research on Earthquake Engineering

Yung-Yen Ko

Jin-Hung Hwang

Dept. of Civil Engineering, National Central University

Dept. of Civil Engineering, National Cheng Kung University

Abstract

This paper presents the reconnaissance results of liquefaction-induced settlements of the Hualien Harbor and other liquefaction locations in Hualien City. The erupted materials from the sand volcanoes were taken to perform laboratory physical index tests for understanding their characteristics. The caisson wharf of the Hualien Harbor suffered little damage and deformation. However, the backyard of caissons suffered significant settlements due to liquefaction of the backfill composed of large size gravel and sand mixtures. The liquefaction phenomenon is very spare and localized in Hualien City, causing no damage to structures, and revealing that the sedimentary environment of Hualien area is not easy for soil liquefaction to occur. The particle sizes of erupted materials around sand vents were larger than those of western plains associated with this earthquake and the 1999 Chi-Chi earthquake, respectively.

Key Words : Hualien harbor, Huaxi road, liquefaction, settlement, sand vent, grain size distribution.



0206花蓮地震發生後,隔天國家地震工 程中心大地組即開始籌組勘災團隊並蒐集災 情資料,規劃勘災工作與行程。其中與大地工 程相關災損現象,除了蘇花、中橫公路與月眉 縣道的一些局部落石與小坍方,僅有花蓮港後 線區域有明顯液化引致之震陷,值得勘查。因 此本文之重點在報告花蓮港的背景資料、震陷 災情與初步分析結果。至於花蓮市其他液化地 點,包括華西路與鄰近營區、美崙溪河岸、國

柯永彦

盛街與國民街、與花蓮溪口本團隊都有進行勘查,並取回液化噴出物進行粒徑分布試驗。以 下摘要說明此次地震勘查結果。

二、花蓮港背景資料

2.1 地理位置與建港過程

花蓮港地理位置為北緯23度59分11秒、 東經121度37分35秒,位於花蓮市區東北方, 東濱太平洋,西依美崙山(圖一)。花蓮港係屬 人工開鑿,東西兩防波堤左右環抱,開口西 南,區分為內、外港,船舶可自外港往北經狹 長航道而進入內港(臺灣港務股份有限公司花 蓮港務分公司,2018a)。

根據花蓮港務分公司資料顯示,花蓮港始 建於日據時期至1940年10月竣工,二戰爆發後 港埠設施悉遭破壞,台灣光復後,於1946年開 始修復至1956年完成。後因配合花東地區經濟 建設與貨運發展趨勢,政府遂於民國1959年開 始逐步拓展花蓮港各項港埠設施,先後共進行 了四期擴建工程計畫。前三期擴建工程共擴建 內港區13座碼頭(今4號至16號碼頭);第四期外 港區擴建工程由1978年7月開始至1991年12月 完成,將港口延伸至美崙溪口,建造9座深水碼 頭(今17號碼頭至25號碼頭),長2,287公尺,水 深12公尺至16.5公尺,延長東防波堤1,837公 尺,新建西防波堤1,050公尺,構築沉箱渠乙座 並填築碼頭新生地55公頃,共完成外港水域面 積1千萬餘平方公尺(陳等人,2000)。



圖一 花蓮港區位置圖

2.2 花蓮港區域地質

花蓮港附近之陸地高程約EL. +20 m,港 區地面高程大部份在10 m以下,而內港地面 比外港稍高,因外港之陸地是填築出來的,碼 頭面高程約EL. +4 m。在西防波堤南側有美崙 溪口,在西防波堤附近水深約為0~17公尺左 右,港口水深約17~20公尺,第四期東防波堤 所在位置之水深均在30公尺以內,而舊東防波 堤所在位置之水深則在10公尺以內。根據陳等 人(2000)之資料顯示花蓮港海上基盤岩層之位 置由岸向海漸深,其深度約由最低水位下10 m 降至35 m;其上覆蓋之堅硬砂礫粉土層或風化 基盤厚度約為5至20 m,亦由岸向海遞增,縱 波波速由1,650 m/s至2,350 m/s。

2.3 花蓮港平面配置

現今花蓮港共25座碼頭,其中內港區16 座(1號碼頭至16號碼頭),水深6.5至10.5公 尺,可靠泊4千噸至1萬2千噸船舶,內港區4 號、5號、6號、8號及9號碼頭之結構型式為 鋼板樁錨定式、7號碼頭結構為混凝土方塊 式,其餘10座碼頭均為混凝土重力式。外港區 碼頭9座(17號碼頭至25號碼頭),水深12至 16.5公尺,可靠泊3萬噸至10萬噸船舶,除17 號與18號碼頭為消波方塊式外,其餘碼頭結構 均為消波沉箱式(謝等人,2009)。

本次0206花蓮地震在花蓮港區造成的震 損災情多集中在外港區(如表一、圖二所示), 包含23號碼頭(P1)至24號碼頭(P2)後線地面 沉陷及液化噴砂、25號碼頭(P3)後線地面沉陷 及碼頭單元間受震產生間隙、西防波堤內港區 道路(P4)土壤液化與道路面版震損、以及19 號至22號碼頭一帶(P5)碼頭後線地面輕微沉 陷等災情。實際花蓮港外港區主要震陷發生地 點請參見圖三。

表一 花蓮港震災勘查點

貼位	位置	距震央	距斷層	雪巛棷泮
		(km)	(km)	辰灭帆処
P1	23號碼頭	19.2	1.53	碼頭後線沉陷、液化噴砂
P2	24號碼頭	19.2	1.63	碼頭後線沉陷、液化噴砂
P3	25號碼頭	19.3	1.71	碼頭後線沉陷、碼頭水平間隙
P4	西防坡堤	19.4	1.54	路面破壞、液化噴砂
P5	19號碼頭	18.4	1.96	碼頭後線沉陷



圖二 花蓮港勘災點位圖



圖三 花蓮港主要震陷區域 (底圖來源: Vincent Chang, 2016)

2.4 碼頭斷面圖

1.23號至24號碼頭

花蓮港23號碼頭(圖二之P1)與24號碼頭 (圖二之P2)為重力式沉箱碼頭,碼頭前緣沉箱 結構上設置有消波方塊構造,設計水深為14 m,沉箱結構寬度為18 m,高度為18 m,碼 頭前緣距後方排水道約有33 m。其中23號碼 頭長度為272 m,主要為客運碼頭使用,24號 碼頭長度為271 m,為油管管道、木料、雜貨 碼頭使用。23號、24號碼頭標準設計斷面如 圖四所示(陳等人,2000)。

2.25號碼頭

花蓮港25號碼頭(圖二之P3)為重力式沉箱 碼頭,沉箱結構寬度為28.5m,碼頭高度為 20.5m,具消波室構造,碼頭設計水深為16.5 m,25號碼頭長度為332 m,主要為雜貨碼頭 使用。由於24號碼頭與25號碼頭法線方向不 同,故24號碼頭沉箱至25號碼頭沉箱之間有一 楔型碼頭過渡段,即圖三之藍色漸變段範圍。 花蓮港25號碼頭標準設計斷面如圖五所示。

3. 西防波堤

根據港灣工程技術庫資料,花蓮港西防波 堤(圖二之P4)自美崙溪口北岸約65 m處,約和 海岸線及等深線垂直方向延伸1050 m,水深自







2000) 2000)

岸邊以1/50坡度向海延伸至水深約-18 m。本 防波堤為接岸堤,港側則是抽砂回填造地,作 為23號至25號深水碼頭用地。

4.19號至22號碼頭

花蓮港19號碼頭至22號碼頭(圖二之P5) 皆為重力式沉箱碼頭,沉箱結構寬度為18m, 高度為18m,碼頭前緣沉箱結構上設置有消波 方塊構造,碼頭設計水深為14m。19號碼頭用 途為油管管道、木料、雜貨碼頭,20號至21號 碼頭為砂石專業碼頭,而22號碼頭為多功能碼 頭,此區碼頭設有裝卸機具設備,機具軌道一 端位於沉箱頂、一端則位於碼頭後線。

三、港區地震記錄之特性

3.1 花蓮地震概述

根據交通部中央氣象局(CWB)所公布之 地震報告(交通部中央氣象局,2018)資料顯 示,民國107年2月6日23時50分42.6秒於花蓮 縣近海發生芮氏地震規模M_L6.0之強烈地 震。震央座標為北緯24.14度、東經121.69度, 位在花蓮縣政府東偏北方18.3公里處,震源深 度為10公里。國震中心依據中央氣象局強震站 (TSMIP)、速報站(RTD)及國震中心地震監測 網觀測站(NCREE)之花蓮地震紀錄繪出花蓮 地區PGA分布如圖六所示,由分析結果可知花 蓮市區地動震度都達5級以上,越靠近米崙斷 層南段PGA越大,而在花蓮南邊、靠近嶺頂斷 層之鹽寮站所量測到地動震度可達7級 (PGA>400 gal)。

3.2 花蓮港區鄰近測站之地動特性

氣象局自2001年1月4日於花蓮港港務大 樓旁素地上設置花蓮港務局強震站 HWA062(見圖二),作為花蓮港區自由場地震 監測記錄,鄰近19號碼頭約400 m處的花蓮高 中亦有氣象局設置的HWA007自由場強震站 (見圖二)。表二為鄰近花蓮港區的測站於本次 花蓮地震所觀測到的強地動數值,本次地震在 花蓮氣象站之震度達7級,而港區HWA062測 站、HWA007測站震度亦有5級至6級,PGA 值皆大於200 gal。由於本次地震造成花蓮港 港區災損情況多集中於外港區深水碼頭一 帶,本文僅就針對鄰近港區災點處之花蓮港務 局HWA062測站紀錄進行強地動特性探討。

1. HWA062測站歷時紀錄

HWA062測站位於測站位於港務局辦公 大樓西南方約12公尺之素地上,根據國震中心 的強震測站場址工程地質資料庫(Engineering Geological Database for TSMIP, EGDT)(國家 地震工程研究中心,2012),本測站有進行現地 鑽探與波速量測,測站場址地質除近地表0.65 m內為粉土質砂層外,以下均為N值大於50之 緊密卵礫石層(GW、GM)。依照現地剪力波速 量測資料,HWA062測站場址Vs30為606 m/s,屬於第一類堅硬地盤。

本研究針對HWA062測站之三方向加速 度歷時紀錄,取總紀錄之40秒至80秒區段之 主要震動歷時部分,該測站之三方向加速度及 速度歷時紀錄如圖九至圖十所示。由加速度波 形可發現本測站在兩個水平向都有一明顯週 期較長之波形,在速度歷時更清楚識別出雙向 振動之正弦波形(此種長週期速度波形稱為速 度脈衝),在EW向PGV值為95.73 cm/s,NS 方向PGV亦達76.72 cm/s。

2. HWA062測站反應譜分析

圖十一為HWA062測站之三方向加速度 反應譜,EW向反應譜在2.3秒具有相當大的譜



圖六 花蓮地區地動分布圖 (國家地震工程研究 中心,2018)

我——们建尼州江湖站也到值						
泪心上	距震央	延時	方向	PGA	PGV	PGD
例町	(km)	(sec)		(gal)	(cm/s)	(cm)
	17.45	180	EW	209.18	95.73	64.58
HWA062 花蓮港森局			NS	202.58	76.72	82.65
			UD	213.80	21.00	30.07
	16.46	157	EW	289.02	100.09	141.83
HWA007 花蓮高山			NS	244.20	68.35	85.32
化建向于			UD	259.95	24.49	95.73 64.58 76.72 82.65 21.00 30.07 .00.09 141.83 68.35 85.32 24.49 39.33 26.60 22.49 95.60 87.28 135.63 72.30
	18.26	326	EW	213.44	26.60	22.49
HWA019 花蓮毎免社			NS	370.24	95.60	87.28
167年末(37年			UD	403.30	135.63	72.30



二 花蓮港鄰近測站地動值



圖十一 HWA062測站花蓮地震加速度反應譜

加速度峰值(Sa)MAX,其值達549 gal;UD向 反應譜則是在短週期約0.08秒處具有譜加速 度峰值。

根據建築物耐震設計規範(內政部營建 署,2011),花蓮港區位於花蓮市,該震區短 週期及一秒週期之設計水平譜加速度係數 *S*^D 與 *S*^D 分別為0.8與0.45;根據HWA062測站場 址Vs30為606 m/s,屬於第一類地盤,則工址 放大係數Fa與Fv皆為1。若考慮花蓮港務局測 站距米崙斷層小於2 km,近斷層效應之近斷 層調整因子Na與Nv則各為1.42與1.58,根據 上述參數可計算得出花蓮港區在考量近斷層 條件下之T₀為0.626。

將花蓮港務大樓場址之震區設計反應譜 繪出比較(圖十一),可明顯看出本次花蓮地震 HWA062測站EW向反應譜於1.8秒至3秒之 長週期處Sa值超過設計反應譜;比較垂直向 反應譜可發現在小於0.09秒之短週期處,本次 花蓮地震在港區實測記錄反應譜值同樣有超 出垂直向設計反應譜之情況。

3. 本次地震花蓮港區地動特性

綜觀上述花蓮港區地震記錄與反應譜,可 發現在EW方向地震歷時具有明顯方向性的速 度脈衝特性,且該脈衝在長週期處具有相當大 的譜加速度,此種現象稱之為近斷層效應 (near fault effect)。由本次花蓮港區地震頻 譜初步比較可知,現階段規範考量之近斷層效 應調整因子只針對反應譜Sa值進行放大,而 設計反應譜形狀並未改變,特別是週期大於 2.5*T*⁰處(Sa=0.4Ss)無法考慮近斷層地震速度 脈衝在長週期之譜加速度峰值突出的特性。這 些近斷層地震動特性如何考量並反應於結構 耐震設計規範,都有賴後續強地動及結構耐震 專家持續研究。

四、港區震陷狀況

4.1 23號碼頭與24號碼頭

花蓮港23號至24號碼頭位於外港南側之突 堤區,此區碼頭法線大致呈西北·東南向,屬消波 沉箱式碼頭。23號碼頭沉箱未觀察到結構體損 壞、偏移或沉陷發生,後線區域則有近20cm之沉 陷,碼頭與後線交界鋪面有平行法線之長裂縫 (圖十二),並可觀察到小規模之積砂。依據花 蓮港務公司初步勘災資料(臺灣港務股份有限 公司花蓮港務分公司,2018b)顯示,此區碼頭 沉箱結構確無明顯位移破壞發生,於23號碼頭 後的旅客中心亦無結構破壞發生。24號碼頭於 靠近23號碼頭側之沉箱未觀察到明顯異狀,但 後線沉陷約20~30cm(圖十三);後線鋪面並出 現多道平行於碼頭法線之裂縫,最大開裂寬度 約10cm,並可觀察到較粗顆粒之噴砂。



圖十二 花蓮港23號與24號碼頭震損情況



圖十三 花蓮港23號與24號碼頭後線破壞

24號碼頭靠近25號碼頭側(接近突堤轉角 處之碼頭過渡段)有兩相鄰消波室單元出現約 9 cm之間距(圖十四);後線沉陷達40 cm,亦 伴隨多道裂縫;裂縫鄰近之地表除了積砂之 外,甚至有大量礫石,最大粒徑近10 cm。

根據港務公司所提供地震當時之監視畫 面,可知23號碼頭與24號碼頭在出現明顯振 動後約15至20秒左右,均觀察到地面裂縫發 生並自裂縫大量冒水之現象,如圖十五所示, 因而夾帶出大量砂與礫石材料,並引致後線之 沉陷。地震作用前,碼頭後線結構面板平整乾 淨、無明顯高低落差(圖十五),對照圖十二所 示之裂縫及砂礫石,可推論此裂縫、沉陷及地 表砂礫石均為地震作用所造成。以上所述,足 證地震時於此處發生土壤液化現象,並且所激 發之超額孔隙水壓足以將粒徑達數公分之砂 礫帶出地表,值得後續進一步探討。

4.2 25號碼頭

本次地震25號碼頭相較於鄰近之23號、 24號碼頭有較嚴重之災損情況,碼頭面有局部 裂隙與坑洞,局部有高低差,特別是24號碼頭 至25號碼頭間的沉箱過渡段與25號碼頭兩者 有明顯水平側移,間隙達8至13 cm(圖十六)。 25號碼頭與其後線接合處發生嚴重龜裂(圖十 七),較前述23號、24號碼頭更為明顯,後線 地表沉陷達到50~60 cm。因此本區碼頭暫停 營運,並將船舶移至19號至22號碼頭作業。



圖十四 花蓮港24號碼頭消波室單元間隙



(a) 地震發生前



(b) 地震發生後25秒

圖十五 23號碼頭地震當晚監視畫面 (花蓮 港務分公司提供)



(a) 碼頭兩側落差 (b) 水平側移 圖十六 25號碼頭與碼頭過渡段破壞情況



圖十七 25號碼頭後線沉陷情況

本區碼頭法線目視仍屬平整,但仍需進一步測 量與檢查沉箱結構是否有破損漏砂。

4.3 西防波堤

西防波堤後線原為柔性鋪面,部分範圍進 行整修時將鋪面改為剛性鋪面,整修區段亦新 設排水溝。原為順接之新、舊結構,由於花蓮 地震後後線基礎出現土壤液化現象,造成結構 受損、破裂等情況如圖十八。柔性鋪面因為基 礎土壤液化淘空而開裂下陷;剛性鋪面則因為 有配筋且剛度較大,因此雖然基礎土壤液化淘 空,未有開裂之情況。現場可以在剛性鋪面下 之裸露地表可以發現許多液化之噴砂孔(圖十 九)。基礎土壤因液化噴砂現象而淘空之情況 如圖二十所示。

4.4 19號至22號碼頭

花蓮港19號至22號碼頭位於花蓮港區之 通往內港航道入口處,法線大致呈東北·西南 向,均屬消波沉箱式碼頭。於地震後,沉箱並 無結構體損壞,亦無目視可觀察到之偏移或沉 陷。本次地震19號碼頭後線區域略有沉陷,造 成碼頭與後線交界約有10 cm之落差;後線之 剛性混凝土鋪面發生龜裂,並於鄰近地表觀察 到積砂,推測地震時曾發生噴砂現象。由於此 區20號、21號碼頭為砂石專業碼頭,設置有 裝卸機具設備,裝卸機具軌道一端位於沉箱, 一端位於背填區,據花蓮港務分公司初步勘災 資料(臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公 司,2018b)顯示,裝卸機具因本次地震造成碼 頭結構與後線背填區差異沉陷影響,略有傾 斜,但現場無法以目視辨識。

4.5 碼頭後線震陷原因初探

由現地勘查結果顯示,碼頭後線之土壤液 化現象主要分布在碼頭後線30 m內,在其之 後即不明顯,除了在後線30 m內沒有發現明 顯噴砂現象外,由現場混凝土柱沒有明顯歪斜 亦可間接證實。經與現場工程師討論,初步判 斷應為沉陷後包覆塊石之濾層老劣化後破 損,導致在其之後的回填材料因海水漲退潮作 用而流至塊石縫隙,甚至被帶出至海水。此範 圍之回填層因材料流失而鬆散不緊實,加上當



圖十八 西防波堤後線結構因基礎土壤液化而 受損情況



圖十九 西防波堤剛性鋪面下液化噴砂孔



圖二十 西防波堤後線基礎土壤液化噴砂現象 而淘空之情況

日海水面較高,因此在地震作用下容易出現土 壤液化現象。在一定範圍(後線30 m)外的地層 因為遠離碼頭後方回填塊石,土石材料流失情 況較不嚴重,地層相對緊實,因此沒有出現明 顯液化情況。以上情況為現場初步研判,後續 建議應進一步釐清確認。

花蓮港碼頭後線30 m以外之區域因為範 圍廣大,花蓮港務分公司為了增加土地利用之 面積並瞭解此地區之地層特性,故在後線外的 範圍挖掘了三處直徑約10 m深度約3 m試 坑。坑底亦設立具有刻度之標度尺,以觀察海 水漲退潮對於地下水位之影響範圍。據花蓮港 現場工程師說明,海水漲潮時試坑內積水約 0.5~1 m。此次現地勘察時因為海水退潮,故 試坑內底部表層沒有積水。由現地觀察未發現 坑底表面有噴砂孔等土壤液化證據,試坑底部 材料主要為粗砂礫石組成,在其上部則覆蓋一 薄層黏土,推估為地表材料隨地表逕流而流至 坑底堆積而成。

五、港區液化潛能評估與沉箱 受震位移分析

5.1 港區液化潛能分析

1. 港區原有地層之液化潛能

本節主要以花蓮港區為範圍,進行港區原 有地層之液化潛能評估,分析本次地震對於花 蓮港區的影響。透過港研中心提供的8孔標準 貫入試驗鑽探資料,其配置如圖二十一所示, 其中,HL1202為鄰近港務大樓之鑽孔,根據 鑽孔資料顯示此處在地表以下20 m深度內, 僅在6.5m處有一厚2.28 m的SM層外,其餘皆 為SPT-N值大於80之砂礫石與中小卵礫石層 (謝等人,2009)。HL1501~HL1506與HL1601 為沿著25號碼頭的鑽孔,其高程為水下14 m 左右,每孔深度皆為10 m,除了在地下1.3 m 左右有一個SPT-N值約為7~10的SM/SP-SM 層外,其餘都為SPT-N值大於30之砂礫石與 中小卵礫石層。

土壤液化簡易評估以HBF法作為代表, 但因為鑽探資料物理性質不完整,因此評估時 進行下列假設:

(1) 假設地下水位面位於地表;

(2)由於鑽探資料並沒有細粒料含量,但 本場址多為砂礫地層,因此假設地層細粒料含 量為0%;

(3)若是遇到完全無液化可能之地層,其 安全係數直接取3。

此分析地震規模採用氣象局公布的6.0, 而最大地表加速度0.21 g則為花蓮港務局測 站的地震歷時中的最大加速度。

圖二十二 (a) 與 (b) 分 別 為 HL1202 與 HL1501~1601的液化分析之結果,由土壤抗液 化安全係數對深度的關係可以發現,鑽孔 HL1202僅在深度6.5 m有一2 m厚的潛在液化 層;而位於25號碼頭的鑽孔,僅有HL1501、 HL1505在地表下1.3 m處有一接近1 m的潛在 液化層,而其他鑽孔則皆顯示其抗液化安全係數 皆大於1。以Iwasaki et al.(1978)提出之土壤液 化潛能指數(liquefaction potential index, LPI) 評估本場址之可能損害程度,發現8個鑽孔的 LPI值皆位於0~5的輕微液化區間內。與謝等人 (2009)進行的液化評估結果有一致的趨勢。花蓮 港區地層多屬砂礫石或中小卵礫石層,使其 SPT-N值較大,此等原地層輕微液化程度,不會 對沉箱基礎產生有影響的沉陷。

2. 沉箱碼頭後線之液化評估

此次地震勘查發現沉箱碼頭後線區域震陷 嚴重,有噴水湧砂的現象。據港務局工程師說 明此段碼頭後線區域之回填材料係採用木瓜溪



河床之砂礫,完工後並無鑽探資料,因此無法 進行評估。對這種複雜的砂礫回填土,目前也 無可靠的評估方法。震後花蓮港務分公司有在 後線地區挖掘幾個試坑,觀察回填材料的狀 況,如圖二十三所示,發現回填材料除砂礫外, 還有塊石,相當複雜。在2016紐西蘭Kaikoura 地震,威靈頓市的中央港也發生嚴重的震陷, 其後線回填材料是岩塊與砂礫的混合材料。像 這種混合大粒徑礫石或岩塊與砂土之疏鬆回填 材料,其液化與震陷特性,值得進一步研究。



圖二十三 花蓮港碼頭後線震後挖掘之試坑

5.2 港區碼頭震損等級評估

現行碼頭結構可分為剛性結構物與非剛 性結構物兩種,前者如重力式沉箱碼頭,後者 如棧橋式碼頭。在地震時,剛性碼頭構造物依 靠自身重力轉化為底部摩擦力來抵抗地震力 側向力作用所造成之滑移力及傾覆力,結構單 元本身甚少因地震而產生破壞,故稱之為剛性 結構。因此,如沉箱式碼頭等剛性結構耐震評 估之焦點,主要以碼頭受震滑移穩定性及抗傾 覆穩定性分析為主(交通部運輸研究所, 2005)。根據國際航海協會重力式碼頭損害等 級(表三)(PINAC,2001)之描述,沉箱式碼 頭震損等級與性能分類可從沉箱壁體水平位 移與傾斜角、以及岸間後線沉陷量等去評估, 屬於輕微影響,可繼續使用之等級。

表三 國際航海協會重力式碼頭損害等級(定量)

損壞等級		等級I 可使用	等級II 可修復	等級III 接近 破壞	等級IV 崩塌 破壞
壁體	正規化水平位 移d/H	< 1.5%	$1.5 \sim 5\%$	5~10%	>10%
	朝海側傾斜角	<3°	3~5°	5~8°	>8°
	不均匀沉陷量	$< 0.03 \sim 0.1 \text{m}$	—	—	—
岸肩	岸肩與後線陸 地沉陷量	<0.3~0.7m	_	_	_
	朝海側傾斜角	<2~3°	_	_	_

依照本團隊花蓮港現地災損調查與花蓮 港務分公司花蓮地震勘災及修復初步評估結 果顯示:外港區各碼頭法線與沉箱並無可觀察 到的側移,23號至24號碼頭後線地面相較碼 頭面沉陷約20~30 cm,屬於等級I-可使用之 狀態;25號碼頭的沉箱單元間有平行法線之水 平間隙約8~13 cm、後線地面相較碼頭面沉陷 達50~60 cm,比對表四之損害等級量化指 標,25號碼頭在震後仍為等級I-可使用之狀 態;19號至22號碼頭一帶只發生後線地面沉 陷約10 cm,同樣為等級I-可使用之狀態。

六、花蓮市土壤液化現象勘查

本次地震除了造成花蓮港區震損與液化災 情發生外,本團隊尚於花蓮市區勘查到其他液化 災點,包含華西路與鄰近營區、美崙溪左岸、國 盛五街至八街與國民八街等處進行液化勘查。根 據本團隊現地調查結果與地調所公布之花蓮地 震相關報告(經濟部中央地質調查所,2018)顯 示,花蓮溪口與花蓮大橋上游高灘地亦有零星之 液化噴砂現象。茲將勘查結果簡要說明如下。

6.1 華西路液化

花蓮地震造成花蓮市華西路之柏油路面產 生鋪面損壞,發生位置介於空軍第401戰術混合 聯隊與國立東華大學創新研究園區間,花蓮機 場位於道路之右側,經定位後此處之經緯度座 標為北緯24°00'48.6",東經121°37'14.4"。

現場勘查後發現現場柏油道路鋪面破損處 表面有大量黃色細質砂土分佈,其下方有明顯 掏空現象,同時在路面周圍及路邊皆有大量相 同性質之細砂(圖二十四(a)),該土樣之色澤與 質地明顯與現地不同,比對鋪面下方土樣可明 顯發現黃色土樣係由道路下方所噴出,並於鋪 面下方發現疑似多個噴砂孔之孔位,噴砂孔最



(a)路面破裂噴砂(b)路面下方噴砂孔圖二十四 華西路道路液化

大直徑約為1.5 cm(圖二十四(b)),圖上噴砂孔 出現位置與鋪面破損之位置呈現一致的走向。

經比對中央研究院人社中心之台灣百年 歷史地圖提供之1921年日治台灣堡圖以及 1956年台灣地形圖,在1921年日治時期在古 地圖上有一南北縱向長條湖泊標註為「モーガ イガイ沼」之處即為當時之七星潭,而在1936 年日本當局將七星潭填平後進行花蓮機場擴 建,因此,於1956年的台灣地形圖上,已可 明顯看出當時花蓮機場的全貌以及華西路所 在之位置,且可以發現本次華西路土壤液化災 情發生之位置確實座落於七星潭舊址之上,因 此,在考量原本即為濕地之地質條件以及當時 回填施工條件的影響,推測應為此地點發生土 壤液化之主因。

6.2 美崙溪左岸液化

本勘災團隊於鄰近尚志橋之美崙溪上游 左側河岸發現有多處土壤液化噴砂現象(圖二 十五),勘災隊除了取出液化土樣供後續室內 試驗用外,尚進行斷面開挖,釐清液化砂土之 噴砂路徑(圖二十六)。如圖所示,土壤液化之 噴砂路徑相當複雜,噴砂孔下之液化砂土噴出 路徑可能幾經轉折、堆積後才噴出,不一定為 一直線噴出,值得後續進一步研究。因為土壤 液化,河岸亦觀察到輕微側潰現象。

6.3 國盛五街至八街與國民八街建物之震陷

此次花蓮地震受損倒坍之白金雙星及吾 居吾宿大樓,引起社會重視。兩棟倒塌建築物 旁之國民八街151號(5樓建築物)震後所產生 之沉陷量約為7~8 cm,在其柱位下方則出現 疑似土壤液化之噴出物(圖二十七),建築物下 方地層是否有土壤液化現象仍有待進一步釐 清。除此之外,以兩棟倒塌建物為中心,在其 附近約100 m範圍內有觀察到許多建築物有 震陷的現象,其沉陷量約為0~15 cm不等,整 個區域之建物沉陷分布結果與原因,尚待後續 調查與研究。

6.4 液化噴出物之物理指數性質試驗

針對有土壤液化表徵區域所採集之土 樣,對其噴出物進行粒徑分析後的結果如



圖二十五 液化砂土之噴砂現象



圖二十六 液化砂土之噴砂剖面



圖二十七 國民八街151號柱位下方疑似土壤液 化之噴出物

表四、圖二十八、圖二十九所示。表四為噴出 土樣的物理性質,可以發現僅有在花蓮港23 號碼頭的土樣為ML,而大部分土樣的土壤分 類為SM、SP或SM-SP,土樣多屬無塑性土 樣。由於碼頭的土樣屬於碼頭後線回填區的液 化,而回填區的土壤主要為塊石、河川砂石與 回填土,因此從土樣間的粒徑分佈的結果可以 發現有細粒料含量較多的土樣,也有粒徑較大 的土樣。另外一方面從古地圖來看,華西路和 美崙溪岸都屬古湖泊或流域的冲積範圍,因此 可以發現噴出來的土樣性質相似,且顆粒的主 要粒徑都集中在0.1 mm左右。

圖二十八為花蓮地震的現場噴砂土樣與 日本港灣技術標準所定義之潛在會液化與會 液化土壤的粒徑分佈比較,可以發現三個地點 的噴砂土樣都落在潛在會液化的土壤粒徑分

	Gravel(%)	Sand(%)	Fines(%)	D50(mm)	USGS	
23號碼頭	1.2%	46.8%	52.0%	0.073	ML	
24號碼頭-1	6.7%	89.4%	3.9%	0.65	\mathbf{SP}	
24號碼頭-2	0.0%	84.6%	15.4%	0.18	SM	
美崙溪岸-1	0.1%	82.4%	17.5%	0.16	SM	
美崙溪岸-2	0.0%	90.5%	9.5%	0.18	SP-SM	
美崙溪岸-3	0.0%	83.0%	17.0%	0.16	SM	
華西路-1	0.4%	88.9%	10.7%	0.18	SP-SM	
華西路-2	0.0%	97.7%	2.3%	0.25	SP	

表四 花蓮地震液化噴砂土樣物理性質與土壤分類



圖二十八 花蓮地震液化噴砂土樣與典型液化噴 砂土樣粒徑分佈曲線之比較



佈範圍內,且有六個土樣的粒徑分佈屬於液化 土壤的範圍內,表示這些區域土壤的確有高液 化潛能。花蓮地震的噴砂土樣粒徑分佈也與 Numata and Mori(2004)對1987年到2000年 間,美洲和亞洲共13個地震與823個土樣的粒 徑分佈做統計分析的結果有一致的趨勢。 Numata and Mori(2004)的結果顯示出回填 區液化的噴砂粒徑分佈都偏細小且細粒料含 量較多,而非回填區的土樣顆粒都較大。從 D50的分佈也可以發現回填區噴砂土樣的 D50可以小到0.02 mm,而非回填區噴砂土樣 的D50幾乎都大於0.1 mm。

圖二十九為本次花蓮地震與921地震液 化噴砂土樣(陳,2002)之粒徑曲線分佈區間的 比較。從圖中可以發現兩者的粒徑分佈極為相 似,但花蓮地震的液化噴砂土樣的粒徑分佈平 均起來較921地震土樣的粒徑大,且921地震 液化噴砂土樣的細粒料含量較多,主要可能是 因為東部地區和西部地區的沉積環境與地質 條件的不同所導致。

需注意的是,液化過程中,液化土層之 土壤將伴隨高壓孔隙水,通過其上方未液化 土層而噴流至地表。因此,噴出物未盡然都 來自於液化土層,尚可能包含其上方未液化 土層之土壤。

七、結論與建議

綜合本團隊0206地震之勘災所見與初步 分析結果,摘要下列結論與建議,期望可供各 界參考。

1. 花蓮港沉箱碼頭在0206地震的考驗 下,雖然後線有明顯沉陷,但各碼頭法線均無 明顯之朝海側外移,沉箱結構亦無傾斜、明顯 沉陷與結構損壞。根據國際航海協會之定義, 損壞程度屬等級I-可使用。然而以大顆砂礫回 填之後線區產生明顯的液化與震陷,此現象與 2016紐西蘭Kaikoura地震威靈頓市中央港 (Centre Port),以大顆粒岩塊與砂礫混合回填 之後線液化震陷現象一致。

 2.其他花蓮市之土壤液化現象均屬局部零星,未產生嚴重液化災情,美崙台地華西路液 化地點與舊七星潭回填與古美崙溪河道有關。

3.國盛五-八街與國民八街建物之建築物 震陷現象,疑似與土壤液化現象有關,尚待進 一步的調查研究。

4.液化噴出物的粒徑分析結果顯示此次 地震噴出物粒徑較921地震噴出物為大,顯示 花蓮地區之沉積環境與西部平原之差異。

5.對於重要的港口,建議碼頭後線之回填 區域,施工時應進行回填滾壓與夯實,或進行 地盤改良,以免強震來襲,產生嚴重之震陷, 影響碼頭運作功能,造成經濟損失。

誌 謝

本次地工勘災承蒙臺灣港務股份有限公

司花蓮港務分公司工程處鍾權宏處長、臺灣港 務公司鄭志宏工程師等多位工程先進協助,安 排花蓮港現場勘災事宜及提供相關勘災資 料;感謝暨南大學王國隆副教授提供相關圖資 工具,謹此致謝。

參考文獻

內政部營建署 (2011),「建築物耐震設計規範及解說」。

- 交通部中央氣象局(2018),「地震活動彙整」,http://www. cwb.gov.tw/V7/earthquake/rtd_eq.htm(2018年5月 18日)。
- 交通部運輸研究所 (2005),「港灣構造物設計基準修訂。」
- 國家地震工程研究中心 (2012),「強震測站場址工程地質 資料庫」http://egdt.ncree.org.tw/news.htm(2018 年5月18日)。
- 國家地震工程研究中心 (2018),「2018.02.06花蓮地震概 要Hualian Earthquake Information,中文版簡報 Ver8.0」。
- 陳森河、陳吉紀、王志成、胡聰明(2000),「港灣工程技 術庫花蓮港部份」,交通部運輸研究所。
- 陳銘鴻 (2002),「土壤液化成因、災害與復建」,臺灣之活 動斷層與地震災害研討會,第107-123頁。
- 經濟部中央地質調查所 (2018),「107年0206花蓮地震地 質調查初步結果」。
- 臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司 (2018a),https://hl. twport.com.tw/chinese/(2018年5月18日)。
- 臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司 (2018b),「107年2 月6日花蓮地震勘災及修復初步評估報告簡報」。
- 謝明志、林雅雯、陳正興、黃富國、徐松圻、邱俊翔、鄭魁 香、葉錦勳、簡文郁、柯永彦、許尚逸、楊鶴雄、張 毓文 (2009),「港灣地區地震潛勢及港灣構造物耐 震能力評估之研究(2/4)」,交通部運輸研究所。
- Vincent Chang (2016),「花蓮港空拍」,https://www. youtube.com/watch?v=YbSaq0ZyC5c(2018 年 5 月 17日)。
- Numata A, and Mori S. (2004). "Limits in the gradation curves of liquefiable soils.", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada, 1190.Newmark, N. M. (1965), "Effect of Earthquake on Dam and Embankment," Geotechnique, Vol. 15, No. 2, pp.139-159.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. and Yasuda, S. (1978), "A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan", 2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, 885-896.
- PIANC/International Navigation Association (2001). "Seismic Design Guidelines for Port Structures", A.A Balkema Publishers.