DOI: 10.6653/MoCICHE.202408_51(4).0002



柯永彦*/國立成功大學土木工程學系大地工程組 副教授

本文選用數個代表性歷史震災中因土壤液化引致之濱水地區地盤側潰案例,利用現場地表變位觀測結果,探討側潰所造成地表變位之空間分佈特性,包括變位量隨距離衰減之趨勢及側潰變位的影響範圍。所探 討案例包括 1995 年阪神地震神戶港區之沉箱碼頭側潰災情,1999 年集集地震於貓羅溪岸與台中霧峰一帶之 河岸側潰,以及 2010 年紐西蘭 Darfield 地震(2010~2011 年基督城地震序列之主震)於 Kaiapoi 地區之河 岸側潰。此外,將以常用之對數衰減與指數衰減模型,以及本文作者所提出之常態分佈和對數常態分佈互補 累積分佈函數,對地表變位之衰減特性進行迴歸分析並,評估各模式之適用性,相關成果將可做為地工震災 防治之參考。

關鍵詞:土壤液化、側潰、地表變位、空間分佈特性、迴歸分析

研究背景與目的

砂質土壤因受震液化失去強度後所導致之近地表 土層水平向運動,一般稱作側潰或側向擴展(lateral spreading),其除造成地盤水平向變位之外,也伴隨地 表開裂。側潰可依發生條件概分為兩類,一類發生於 傾斜地盤,坡度通常在5%以內,若坡度更大則常歸類 為流動破壞(flow failure);另一類則是朝向海岸、河 岸或地形落差處等地盤自由面(free face)移動^[1]。前 者係受重力驅動而向下坡方向運動,後者則因自由面 外無側向束制所致,且因後者可能發生於人口密集之 平原區,故較常見且影響較大。

側潰與沉陷同為土壤液化時常見之地盤變位型 態,雖側潰發生範圍常不若沉陷廣泛,但其危害有過

* 通訊作者, yyko@ncku.edu.tw

之而無不及,除地表開裂之外,其推擠作用可能使地 下結構如基礎位移甚至破壞,如1964年新潟地震之側 潰造成多棟建築之基樁撓曲或剪力破壞甚至斷裂,甫 完工數個月之昭和大橋則因基樁側向變形而倒場^{[2]。}側 潰亦可能損壞濱水構造物如河堤與碼頭等,如1995年 阪神地震造成神戶港之人工島發生大範圍液化災情, 液化側潰合併慣性力作用使重力式沉箱碼頭向海側外 移達5米,外傾達4度^[3],另有棧橋式碼頭因受側潰引 致地盤變位作用而外移約1.3~1.7m,並因此使樁帽開 裂及鋼管樁局部挫屈^{[4]。}在台灣,1999年發生了近百 年來規模最大、災情最嚴重之集集地震,除造成台中 港1~4A 號碼頭因側潰導致沉箱岸壁外移及背填地表 嚴重陷落外,也發生了河岸側潰的案例,包括南投貓 羅溪沿岸側向變位達1m,台中霧峰乾溪流域甚至因此 造成建物滑移與傾斜^{[5]。} 進入 21 世紀以來,迄今最具代表性的液化災害, 包括 2010~2011 年紐西蘭基督城(Christchurch)地震 序列,當中以 2010 年 9 月之主震 2011 年 2 月之餘震 災情較嚴重,均於 Avon 河下游區域嚴重液化與側潰, 沿岸地區地表多處開裂,鄰近道路鋪面、地下管線與 大量住宅受損,橋梁基礎亦因此位移^[6]。此外,2011 年東日本大震災(M_w = 9.1)除海嘯與福島核電廠等重 大災害外,因震動延時長達數分鐘,距震央近 400 公 里之東京灣沿岸地區仍發生大規模土壤液化;其中, 建立於新生地上之浦安市有 85%的地區發生液化現象 ^[7],且海岸線多處發生側潰,造成地表位移達數米伴隨 嚴重開裂,如圖 1 所示。

台灣位於西環太平洋地震帶,地震為無可避免之 天然災害;台灣之人口與經濟活動多集中於西半部之 沖積平原區,常屬於地下水位偏高且質地疏鬆之砂性 土層,故地震時之土壤液化為吾人所必須正視之威 脅;加上台灣四面環海,又有許多河流,故有許多具 液化潛能之濱水砂質地盤,液化引致之地盤側潰將可 能損傷座落其上之碼頭、橋梁及臨岸建築。為了防治 液化側潰之危害,首要工作在於了解側潰所造成地盤 變位之特性,如此方能掌握其變位量與影響範圍。因 此,本文特收集前述之1995年阪神地震、1999年集集 地震、及 2010 年紐西蘭 Darfield 地震(即 2010~2011 年基督城地震序列之主震)之災後地表變位觀測資 料,觀察其空間分佈特性,包含變位量隨觀測點至自 由面距離衰減之趨勢,以及側潰變位的影響範圍,並 嘗試以不同之變位衰減模式描述之,以了解各模式之 適用性,相關成果將可供濱水液化高潛勢區之側潰防 治與基礎耐震設計參考。



圖 1 2011 年東日本大震災浦安市海濱公園側潰(柯永彦攝)

歷史震災中之液化側潰引致地盤變位案例

發生於 1964 年 6 月 16 日,地震矩規模(M_w)為 7.6 之新潟地震常被認為是開啟後世土壤液化研究之關 鍵,其對液化災情有詳盡之調查與記錄,因而在學術 上與工程上具有重要參考價值。新潟地震中之液化側 潰造成大規模之地盤變位與地表開裂,觀察到之最大 位移達 10 m,並進一步使許多座落於地盤上之結構破 壞^[2]。其中,在昭和大橋倒塌災害所發生之信濃川沿 岸地區,Hamada *et al.*^[8]由震前震後空拍圖之比較,對 側潰引致之地盤變位進行詳細的測量。其結果顯示, 在距離河岸約 100 m 處之鐵道,仍有約 1 m 之地表變 位,至河岸處位移則大幅增加至 7 m。值得注意的是, 此處雖然地表與液化層頂部均屬平緩,但因河岸自由 面之存在,且液化層達地表下 10 m,加上液化層下方 地層略向河岸傾斜,故造成可觀之地盤變位。

1995年1月17日之阪神地震(M_w = 6.9)在神 戶造成許多液化側潰災情,尤其是神戶港區由填海 造陸形成之人工島,如港島(Port Island)與六甲島 (Rokko Island)等,並導致許多沉箱碼頭岸壁之傾斜 或高達3~4m之外移^{[9]。}針對前述區域,Ishihara *et al.* ^[9]對地表裂縫寬度進行測量並予以累計,便可估算出地 表變位分佈曲線,藉此掌握其沿水平向變化之趨勢, 如圖2所示,此方法日後也被其他學者廣泛應用;根 據相關成果,其指出變位量由海岸向後線30m之範圍 內呈現明顯之衰減,但地表變形範圍(即側潰影響範 圍)則可延伸達150m左右;此外,地表變形範圍大 致上有隨海岸外移量增加之情況。

1999年9月21日集集地震中(芮氏規模 M_L = 7.3, M_w = 7.6),液化側潰主要發生在中台灣屬粉土質砂



層之河濱地區,如前文提到之南投貓羅溪、台中霧峰 乾溪流域等。其中,李德河與古志生^[10] 在貓羅溪沿 岸利用震測錐貫入試驗(seismic cone penetration test, SCPT)發現地表下 0.7~4 m 範圍之粉土質砂層錐尖阻 抗與剪力波速均偏低,且粒徑分佈與噴砂土樣接近,推 測其屬液化土層,其下方至深度約9m則主要為夾礫砂 層與礫石層^[11],但仍因側潰而使地表產生可觀變位量, 顯示側潰之驅動僅需數米深度範圍之土層發生液化。此 外,根據林成川^[12]之調查,於霧峰乾溪支流鴿屋坑溪 之溪岸,地盤因側潰所引致之水平位移約0.5~3m,側 潰影響範圍約20~70m;其也發現側潰範圍內之房屋 傾斜方向常與地盤側移方向相反,此與土坡發生弧形滑 動破壞時之情況相似。

2010年9月到2011年12月間,紐西蘭基督城周 邊地區接連遭六起強震襲擊,其中以2010年9月4日 發生於基督城以西 Canterbury 平原者者規模最大(M., = 7.1), 並因此誘發後續一系列地震; 然而, 發生於 2011年2月22日 M_w=6.2者,因震源較靠近基督城, 引起最劇烈之強地動,最大地表加速度(PGA)超 過 0.5 g,也因此造成最嚴重之災害,市區許多建築倒 塌,共造成185人死亡。由於基督城地區上部地層為 年輕且地下水位淺之沖積土層,故2010年9月與2011 年2月之地震均造成大規模土壤液化災情,部分地區 甚至在此二次地震中有重複液化之情況。其中,Avon 河畔與 Kaiapoi 河流域發生嚴重側潰現象,河岸變位量 達 2 m 以上, 側潰影響範圍約 100~200 m [13]。值得注 意的是,當中可觀察到不同之地盤側潰破壞型態,包括 地表變位係由許多平均分佈之小裂縫累積而成之均佈型 破壞(distributed failure),以及地盤被數個寬裂縫分隔 為數個塊體並向水際線移動,使地表變位量集中發生於 寬裂縫處之塊體型破壞(block-type failure)^[14],分別如 圖 3(a) 與圖 3(b) 所示。

值得注意的是,前文所述歷史案例顯示側潰大多 發生於河岸或海岸附近,因此自由面側潰屬較常見且 工程上較關注之情況,本文後續亦將以自由面側潰為 主要探討標的。

液化側潰引致地表變位隨距離衰減之模式

Bartlett and Youd [1] 分析 1964 年新潟地震信濃川附



近側潰引致地盤變位資料,歸納出影響自由面側潰所 造成地表水平向位移最主要之場址因素,為觀測點至 自由面(即水際線)之距離,兩者間略呈對數衰減關 係,如圖4所示;但可注意到圖中所示迴歸式之 R² 值 僅 0.317,相關性並不高,這可能是因為圖4之資料來 自離散分佈之測點,並非沿特定測線所量測之結果。 但此模式後續納入其他代表性歷史地震之側潰變位資 料,並進行多元線性迴歸分析(multi-linear regression, MLR)識別出其他重要影響因子^[15,16],相關成果被認 為是最具參考價值之側潰變位估算模式^[17]。



本文中,則利用下式來描述側潰引致地表變位:

$$\frac{D(x)}{D_0} = a \ln\left(\frac{x}{L}\right) + b \tag{1}$$

其中,x為觀測點至自由面之距離,D(x)為觀測點之水 平向地表位移,D₀為自由面地表位移,L為側潰影響 範圍之長度(自水際線起算),式中分別將對、D(x)對 D₀正規化;a、b為迴歸分析之待定係數。

Tokimatsu and Asaka^[18] 根據 1995 年阪神地震之神 戶港側潰引致地表變位調查資料,包括 Ishihara *et al.*^[9] 之研究成果,歸納出 *D*(*x*) 與*x* 有以下指數衰減關係:

$$\frac{D(x)}{D_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{cx}{L}}$$
(2)

其由實測資料歸納出 $L = (25 ~ 100) D_0$,並建議以 $L = 50 D_0$ 為代表;此外,其建議指數項中之常數 $c = 5 \circ$ 本文中應用式(2)時,L值將依實際側潰變位之影響範圍決定,c值則以迴歸分析求取之。

須注意的是,歸納出式(1)與式(2)所依據之資料分 別來自河岸附近與港區之側潰變位調查,較適用於自 由面側潰之情況。此外,地表位移與觀測點至自由面 距離之間,不論是呈對數衰減或指數衰減關係,均顯 示越接近自由面處之地盤變位對所累積地表絕對位移 之貢獻越大,此特性與前文提到的均佈型側潰變位型 態(圖3(a))較相似,預期能有較佳之詮釋。然而,對 塊體型側潰變位型態(圖3(b)),對數或指數等單調衰 減關係可能較難精準描述之;若考慮變形曲線特性, 相較於均佈型變位型態屬凹向上(單曲率)曲線,塊 體型變位型態更類似於雙曲率甚至多曲率曲線,針對 此類情況,本文作者(Ko and Rahayu.J,^[19])建議可採 具雙曲率特性之常態分佈(normal distribution)累積分 佈曲線(cumulative distribution function, CDF):

$$\Phi\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right) = \int_{-\infty}^{z} f(z) \, dz \tag{3}$$

其中,f(z)為隨機變數之常態分佈機率密度函數 (probability density function, PDF),常用來描述許多自 然過程之機率分佈;其函數曲線呈對稱鐘形,故累積 分佈曲線呈雙曲率特性。當z之均值為 μ 、標準差為 σ 時,f(z)可表為:

$$f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-1}{2}\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)^2}; \quad -\infty < z < \infty$$

$$\tag{4}$$

考慮到側潰引致地表變位通常於自由面最大,並隨與 自由面的距離遞減,故可採常態分佈之互補累積分佈 曲線(complementary cumulative distribution function, CCDF)描述之,如式(5)所示:

$$\frac{D(x)}{D_0} = 1 - \Phi\left(\frac{\hat{x} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right)$$
(5)

其中, $\hat{x} = x/L$, $\hat{\mu}$ 與 $\hat{\sigma}$ 分別為 \hat{x} 之均值與標準差。

基於類似的概念,亦可採用同樣具雙曲率特性之 對數常態分佈(log-normal distribution) CCDF 來描述 自由面側潰地表變位,如式(6)所示:

$$\frac{D(x)}{D_0} = 1 - \Phi\left(\frac{\ln \hat{x} - \hat{\mu}^*}{\hat{\sigma}^*}\right) \tag{6}$$

其中, $\hat{\mu}^* = \exp(\hat{\mu})$, $\hat{\sigma}^* = \exp(\hat{\sigma})$ 。

歷史側潰案例之地表變位特性

本節於 1995 年阪神地震、1999 年集集地震、及 2010 年紐西蘭 Darfield 地震各擇一處側潰案例,根據 前人之現地調查成果,觀察與探討其地表變位特性。

1995年阪神地震神戶港港島側潰案例

在此採用 Ishihara et al.^[9] 於神戶港最大人工島一港 島之現地調查成果,觀察其地表變位特性,其測線位 置詳如圖 5,各測線之地表變位與觀測點至自由面距離 之關係如圖 6 所示。由圖可知,地表變位均隨距離衰 減,並大多於鄰近水際線處衰減最明顯,原因可能是 神戶港區碼頭岸壁大部分屬沉箱型式,其於地震時將 承受可觀之地震慣性力,並在其背側地盤液化側潰之 共同作用下,沉箱幾乎均產生明顯之向海側變位^[20]。



▲ 5 1995 平版神地晨神尸港之港島側演引致地衣愛位 調查測線位置(根據 Ishihara et al.¹⁹ 重繪)



圖 6 1995 年阪神地震神戶港之港島側潰引致地表變位隨 距離衰減關係(資料取自 Ishihara et al.^[9])

1999 年集集地震台中霧峰側潰案例

在此採用林成川^[12]於台中霧峰乾溪支流鴿鳥坑溪之 溪岸地表裂縫寬度調查成果,測線位置見圖7,並進一步 利用 Ishihara *et al.*^[9]之方法求取各測線地表變位分佈,如 圖8所示,可知其距離衰減之趨勢不如神戶港案例明顯。 值得注意的是,此案例中屬溪岸側潰,雖然當中部分具護 岸設施,其於地震中所受之慣性效應並不如重力式擋土構 造(如沉箱岸壁)明顯,故自由面之變位主要來自於側潰 土體之推擠,此可能即為造成前述趨勢之原因。

2010 年紐西蘭 Darfield 地震 Kaiapoi 地區側潰 案例

在 2010 年 Darfield 地震中,基督城北方之 Kaiapoi 河流域遭受嚴重側潰災情,於災後曾利用 Ishihara *et al.*^[9] 建議方法對地表變位進行詳細的調查^[14,21], 本文中將呈現於 South Kaiapoi 之 Courtenay 溪(為 Kaiapoi 河支流) 溪岸與 Courtenay 湖岸之成果,其測 線位置見圖 9,各測線地表變位隨距離衰減之關係如



地表裂缝寬度調查測線位置(根據林成川 [12] 繪製)



圖 8 1999 年集集地震台中霧峰鴿鳥坑溪之溪岸側潰引致 地表變位隨距離衰減關係(根據林成川^[12]估算)

圖 10。結果顯示,各測線變位分佈,均類似於前述之 塊體型破壞,並因此使變位分佈呈現出雙曲率甚至多 曲率之特性,此現象這可能與 South Kaiapoi 之測線下 方存在 Waimakariri 河之舊河道有關^{[21]。}



圖 9 2010 年 Darfield 地震 South Kaiapoi 地區側潰引致 地表變位調查測線位置(根據 Robinson^[14] 重繪)



圖 10 2010 年 Darfield 地震 South Kaiapoi 地區側潰引致 地表變位隨距離衰減關係 (資料取自 Robinson^[14])

地表變位隨距離衰減模式於歷史側潰案例 之應用

本節將前文所介紹之地表變位隨距離衰減模式, 應用於上一節所述案例之地表變位資料進行迴歸分 析,以檢視各模式之適用性。須注意的是,由於對數 函數之特性在以對數衰減關係進行迴歸時,自由面變 位並未納入。

1995年阪神地震神戶港港島側潰案例

本案例之側潰變位型態較類似均佈型(圖2(a)), 故在此僅採用對數衰減關係(式(1),圖例中表為Log decay)與指數衰減關係(式(2),圖例中表為Exp decay)來進行迴歸分析。首先,選取圖6中P1測線之 變位資料為例,其迴歸結果如圖11所示,若迴歸之擬 合程度以R²值為指標來評估,則以對數衰減之迴歸結 果略優於指數衰減,但兩者R²值均大於0.9,顯示對數 與指數衰減在此案例中均能合理詮釋地表變位趨勢。

接著,對圖 6 中其他曲線亦以式(1)與式(2)進行迴 歸分析,所得之係數及 R² 值詳列於表 1。結果顯示, 對數衰減關係之擬合程度則較為平均,各測線 R² 值均 大於 0.8;指數衰減關係之 R² 值除了在 P'8 測線約為 0.74 外,其他測線亦大於 0.8;整體而言,兩者擬合程 度相當,均相當適用在神戶港港島側潰案例。由於指 數衰減關係是由 Tokimatsu and Asaka^[18]歸納神戶港地 表變位資料後所建議,可預期其有良好結果;但對數 衰減關係亦呈現同等效果,則印證了 Bartlett and Youd 一系列研究之廣泛應用性。

1999 年集集地震台中霧峰側潰案例

本案例之側潰變位隨距離衰減之趨勢不如神戶港 港島案例明顯,且圖 8 中部分關係曲線略有雙曲率特 性(如圖 8 中之 L4 測線),故在此除了對數與指數衰



表1 1995 年阪神地震神戶港之港島側潰引致地表變位隨距離 衰減關係—各測線迴歸分析所得係數彙整

測線	對數裡	衰減關係 - ゴ	指數衰減關係 - 式(2)		
	а	b	R^2	С	R^2
P1	- 0.2489	-0.0702	0.9224	6.399	0.9061
P2	- 0.4493	- 0.0662	0.9778	5.278	0.8390
P6	- 0.2480	0.0105	0.9410	5.989	0.9658
P'6	- 0.2113	0.162	0.8990	2.706	0.8543
P'7	- 0.2866	- 0.1327	0.8378	8.566	0.9488
P'8	- 0.1915	- 0.1103	0.8553	9.445	0.7391

減模式外,亦採用常態分佈 CCDF(式(5),圖例中表為 Normal CCDF)與對數常態分佈 CCDF(式(6),圖例中表為 Log-nor CCDF)進行迴歸分析。在此以 L4 測線資料為例,其迴歸結果如圖 12 所示,以常態分佈 CCDF 之擬合程度最佳, R² 值高達 0.97,而對數衰減 關係與對數常態分佈 CCDF 亦有不錯表現, R² 值均在 0.9 附近,僅指數衰減關係之 R² 值較低。

所有測線迴歸分析所得係數及 R² 值詳列於表 2, 整體而言,對數衰減關係在各測線可穩定獲得高 R² 值 (均大於 0.85),相較其他簡化公式有較佳表現;然 而,因對數衰減關係迴歸時未納入自由面變位,由圖 12 可知此應為擬合程度較佳之部分原因。指數衰減關 係之 R² 值則介於 0.70~0.96,亦有不錯表現。常態分 佈與對數常態分佈 CCDF 則是對變位型態略有雙曲率 特性之 L2 與 L4 測線有較佳擬合效果,尤其前者 R² 值 均大於 0.9。



a 12 1999 平桌集地晨台 甲 務唑碼馬玩溪之溪岸側 須 5 至 地表變位隨距離衰減關係—L4 測線之迴歸分析結果

测	對數衰減關係-式(1)			指數衰減關係-式(2)			
線	а	b	R^2	С		R^2	
L1	-0.6511	-0.0017	0.8627	3.142		0.7813	
L2	-0.4540	0.1004	0.9311	1.950		0.9610	
L3	-0.4570	0.0189	0.9630	3.102		0.9046	
L4	-0.7643	0.0617	0.9151	1.657		0.6985	
測線	常態分佈 CCDF-式(5)			對數常態分佈 CCDF-式(6)			
	ĥ	σ	R^2	$\hat{\mu}^*$	σ	*	R^2
L1	0.5974	0.0962	0.5596	-0.5806	0.14	456	0.5340
L2	0.4455	0.0972	0.9219	- 1.046	0.24	445	0.7720
L3	0.4719	0.0960	0.7550	- 0.9515	0.22	255	0.6572
L4	0.5748	0.0927	0.9742	-0.6002	0.14	432	0.8900

表 2 1999 年集集地震台中霧峰鴿鳥坑溪之溪岸側潰引致地 表變位隨距離衰減關係—各測線迴歸分析所得係數彙整

2010 年紐西蘭 Darfield 地震 Kaiapoi 地區側潰 案例

本案例之側潰變位型態多呈現雙曲率特性(圖 10),可歸類為塊體型(圖2(b)),可能不易被對數與指 數衰減關係適切描述,故在此兼採對數與指數衰減以 及常態分佈與對數常態分佈 CCDF 進行迴歸分析。以 圖 10之 Kps5 測線資料為例,圖 13 為其迴歸結果,一 如預期,對數與指數衰減之 R² 值均較神戶港港島案例 為小,顯示兩者詮釋塊體型破壞之效能較差,但對數 衰減關係還是優於指數衰減關係;而常態分佈與對數 常態分佈 CCDF 則較前兩者具有較佳之擬合度,顯示 以雙曲率曲線描述塊體型破壞確為一可行之方向。



圖 13 2010 年 Darfield 地震 South Kaiapoi 地區側潰引致地表 變位隨距離衰減關係—Kps5 測線之迴歸分析結果

表 3 彙整了所有測線迴歸分析所得係數及 R²值, 可以看出常態分佈與對數常態分佈 CCDF 大致上對此 類塊體型破壞之變形分佈有較佳之擬合效能,在部分 測線可達近 0.9,又以前者表現較為平均;對數衰減之 R²值介於 0.34~0.79,對部分測線詮釋不佳;指數衰減 則表現最差,於大部分測線之 R²值小於 0.5,最高者也 僅有 0.55。

表 3 2010 年 Darfield 地震 South Kaiapoi 地區側潰引致地表 變位隨距離衰減關係—各測線迴歸分析所得係數彙整

測	對數衰減關係-式(1)			指數衰減關係-式(2)			
線	а	b	R^2	С		R^2	
Kps5	-0.5970	0.0098	0.7736	3.703		0.4272	
Kps6	-0.4018	0.4166	0.3419	1.556		0.3762	
Kps7	-0.3307	0.3136	0.4892	2.185		0.5357	
Kps8	-0.3026	0.2743	0.4436	2.822		0.3843	
Kps9	-2.2462	- 0.2794	0.6924	2.632		0.0406	
Kps10	-0.7999	-0.0742	0.7919	4.083		0.5499	
測線	常態分佈 CCDF-式(5)			對數常態分佈 CCDF-式(6)			
	ĥ	ô	R^2	$\hat{\mu}^*$	ô	k	R^2
Kps5	0.4587	0.1332	0.8983	-0.8688	0.3477		0.8176
Kps6	0.8351	0.5182	0.7229	- 0.2455	0.2996		0.5838
Kps7	0.7270	0.2073	0.8920	-0.4577	0.5018		0.7269
Kps8	0.6733	0.1436	0.5733	- 0.5659	0.3991		0.4458
Kps9	0.6945	0.0404	0.8705	- 0.3701	0.0578		0.8649
Kps10	0.5195	0.1870	0.8666	- 0.6709	0.29	22	0.8881

結論

透過綜整代表性液化側潰歷史案例之災後現地調 查資料,歸納自由面側潰引致地表變位之空間分佈特 性,由所得結果可得到以下結論:

- 當側潰引致地表變位隨觀測點至自由面距離有顯 著衰減時,其變位分佈將近似於指數衰減關係;
- 針對具有雙曲率甚至多曲率特性塊體型變位型 態,以常態分佈與對數常態分佈 CCDF 可獲得良 好擬合結果;
- 對數衰減關係大致適用於各類型側潰變位型態之 描述,惟須注意其並無法納入自由面位移之影響。

誌謝

本研究承蒙科技部(現改制為國家科學及技術委員會)專題研究計畫惠予補助,計畫編號:MOST 110-2221-E-006-048-MY3,特此申謝。

參考文獻

- Bartlett, S.F. and Youd, T.L. (1992). Empirical Analysis of Horizontal Ground Displacement Generated by Liquefaction-Induced Lateral Spreads, Technical Report NCEER-92-0021.
- Hamada, M. (1992). "Large ground deformations and their effects on lifelines: 1964 Niigata earthquake." in: Hamada, M. and O'Rourke, T.D. (eds), Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes, Vol. 1, Japanese Case Studies, Technical Report NCEER-92-0001, Chapter 3.
- 3. Iai, S. (1998). "Rigid and flexible retaining walls during kobe earthquake." 4th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, MO.
- PIANC (World Association for Waterborne Transport Infrastructure) (2001). Seismic Design Guidelines for Port Structures, A.A. Balkema Publishers, Lisse, Netherlands.
- 黃俊鴻、楊志文、譚志豪、陳正興(2000),「集集地震土壤液化 之調查與分析」,地工技術,第77期,第51-64頁。
- 6. 陳正興、陳家漢(2014),「地震引致的土壤液化與側潰現象」, 科學發展,第498期,第12-17頁。
- Yasuda, S., Harada, K., Ishikawa, K., and Kanemaru, Y. (2012).
 "Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake." *Soils and Foundations*, **52**(5), 793-810.
- Hamada, M., Towhata, I., Yasuda, S., and Isoyama, R. (1987). "Study on permanent ground displacement induced by seismic liquefaction." *Computers and Geotechnics*, 4(4), 197-220.
- Ishihara, K., Yoshida, K., and Kato, M. (1997). "Characteristics of lateral spreading in liquefied deposits during the 1995 Hanshin-Awaji Earthquake." *Journal of Earthquake Engineering*, 1(1), 23-55.
- 李德河、古志生(2001),「液化區 CPT 資料之探討」,土木水利 工程學刊,第13卷,第4期,第779-791頁。
- 11. Chu, D.B., Stewart, J.P., Youd, T.L., and Chu, B.L. (2006). "Liquefaction-induced lateral spreading in near-fault regions during

the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(12), 1549-1565.

- 12. 林成川(2002),921 集集大地震霧峰地區土壤側潰,國立中興大 學土木工程學系碩士論文。
- Cubrinovski, M. and Robinson, K. (2016). "Lateral spreading: Evidence and interpretation from the 2010-2011 Christchurch earthquakes." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 91, 187-201.
- Robinson, K. (2016). Liquefaction-Induced Lateral Spreading in the 2010-2011 Canterbury Earthquakes, PhD Dissertation, University of Canterbury.
- Bartlett, S.F. and Youd, T.L. (1995). "Empirical prediction of liquefaction-induced lateral spread." *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(4), 316-329.
- Youd, T.L., Hansen, C.M., and Bartlett, S.F. (2002). "Revised multilinear regression equations for prediction of lateral spread displacement." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **128**(12), 1007-1017.
- 17. 翁作新、陳正興、黃俊鴻(2004),「國內土壤受震液化問題之檢 討」,地工技術,第100期,第63-78頁。
- Tokimatsu, K. and Asaka, Y. (1998). "Effects of liquefaction-induced ground displacements on pile performance in the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake." *Soil and Foundations*, 38, special issue, 163-177.
- Ko, Y.Y. and Rahayu.J, T.K. (2022). "Distribution characteristics of surface displacement due to lateral spreading of liquefied ground." *Journal of GeoEngineering*, 17(4), 175-187.
- Iai, S., Sugano, T., Morita, T., and Ichii, K. (1997). "Seismic performance of quay walls -Kobe Earthquake-." Proceedings of Earthquake Criteria Workshop, Yokohama, Japan, 1-29.
- Cubrinovski, M., Robinson, K., Taylor, M., Hughes, M., and Orense, R. (2012). "Lateral spreading and its impacts in urban areas in the 2010-2011 Christchurch earthquakes." New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 55(3), 255-269.

土木水利 双月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文,以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向,為一綜合性刊物,內容分工程論著、 技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄,歡迎賜稿,來稿請 email: service@ciche.org.tw 或 寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓,中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收,刊登後將贈送每位作者一 本雜誌,不再另致稿酬;歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章,相關注意事項如後:

- 工程新知及技術報導,行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得,工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之 報導。
- ▲ 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章,由本刊委請專家1~2人審查,來文請寄電子檔案,照片解析度需300dpi以上。
- 文章應力求精簡,並附圖表照片,所有圖表及照片務求清晰,且應附簡短説明,並均請註明製圖者及攝影者,請勿任意由網站下載圖片,以釐清版權問題。