

# 2018.9.28印尼Palu-Donggala地震Petobo地區土壤液化引致地層滑動事件之現地踏勘(I)

張睦雄\* 黃任中 涂家利 賈立

雲林科技大學營建工程系

雷莉

印尼三寶瓏州立大學

莫漢德

印尼國防大學

## 摘要

2018年9月28日於印尼蘇拉維西島(Sulawesi)發生規模 $M_w$ 7.5大地震，除造成該島首府帕盧市(Palu)所在峽灣之海嘯外，也引發其內陸地區多處大規模的土壤液化滑動。本文說明其中最主要的土壤液化滑動事件，發生在帕盧市東南方的Petobo地區。在此地震造成的液化滑動中，Petobo之滑動面積排第二(1.64 Km<sup>2</sup>)、僅次於Jono Oge，然而其滑動距離遠(>800m)、災損最為嚴重(估計>3300棟房屋毀損及~2000人死亡)。這些滑動區存有若干共同點，包括：原地表平均坡度平緩(<3°或<5%)且滑動區上緣緊鄰灌溉渠道等。至今，造成長距離滑動原因仍諸多揣測、尚無結論；本文作者群到現地進行踏勘、鑽探與試驗，祈能對於滑動原因與機制有所釐清。以下內容說明本研究初步成果第一部分，包含滑動區之現地觀察與地形地物變化；至於其他如災民訪談和滑動地表特徵與分區等，則於下一篇Part-II文章說明。

**關鍵字：**地層滑動、土壤液化、現地踏勘、地形地物變動、2018 印尼帕盧地震。

## Site Reconnaissance of Liquefaction-Induced Petobo Landslide during 2018.9.28 Palu-Donggala Indonesia Earthquake (I)

Muhsiong Chang\* Ren-Chung Huang Togani C. Upomo Galih A. Prayitno

National Yunlin University of Science &amp; Technology (YunTech)

Rini Kusumawardani

Universitas Negeri Semarang (Unnes), Indonesia

Muhammad H. Fansuri

Universitas Pertahanan Indonesia (Unhan), Indonesia

## Abstract

The incident of  $M_w$ 7.5 Palu-Donggala earthquake, occurred on September 28 of 2018 in Sulawesi island of Indonesia, has resulted in significant tsunami along the bay of Palu City, and several large-scale liquefaction-induced landslides inlands. This paper discusses the most severe landslide during this earthquake, located in Petobo area to the south-eastern suburb of the city. The sliding area in Petobo was the second largest (1.64 Km<sup>2</sup>), next to Jono Oge, among all of the landslides in this earthquake. However, the sliding distance in Petobo was very long (>800m) and the consequence of damage was most serious (estimated >3300 houses collapsed and ~2000 fatalities). Some common aspects are noticed in these liquefaction-induced slides, including low-reliefs of the ground (<3° or <5%) prior to failure and close proximities to an irrigation channel along crest boundaries of slide, etc. So far, speculations on possible causes of the long-distance slides still remain and no conclusion is available. In a way to clarify the causes and mechanism of slide, the authors conducted an onsite reconnaissance as well as subsurface explorations and testing at the Petobo site. The following paper addresses the first part of our preliminary results on the surface observations and variations before and after the sliding. Results of witness interviews and characterization of morphologic zones of the site will be discussed subsequently in the associated (Part-II) paper.

**Key Words :** landslide, soil liquefaction, site reconnaissance, variations of surface features, 2018 Palu-Donggala earth-quake of Indonesia.

\* 通訊作者 changmh@yuntech.edu.tw

## 一、前言

2018年9月世界上分別在日本北海道與印尼蘇拉維西島發生兩起重大地震事件。當年9月6日03:08北海道胆振東部發生規模 $M_w$ 6.6地震，造成胆振地區出現震度VII (PGA >600 gal; Japan Meteorological Agency, JMA震度)之地表振動。地震造成火山灰堆積地層的札幌市區內多處發生土壤液化與流動現象，也在厚真町產生大規模山崩與民房掩埋；事件總共造成42人死亡、建物462棟全倒(盧志杰等人, 2019; Kobayashi et al.; 2019 Takahashi & Kimura, 2019)。地震災害發生後，日本與諸多國際間政府與民間單位，包含台灣研究團隊等，隨即進入災區進行救災與研究相關工作。

同年9月28日當地時間18:02印尼蘇拉維西島(Sulawesi)帕盧(Palu)地區亦發生了規模 $M_w$ 7.5地震，除了引致帕盧海灣地區高達11m的海嘯外，內陸地區亦發生多處嚴重的土壤液化地盤滑動或流動現象(PuSGeN, 2018)，如圖一所示。地震於帕盧地區產生震度高達IX-X (PGA >750 gal; Instrumental Intensity)之地表振動，也造成嚴重災情，包括超過4,400人罹難與100,400房屋毀損(PuSGeN, 2018; CSPG, 2018)。

地震發生後印尼政府與部分國際組織曾進入災區勘災救援，然而災害地區範圍大且散佈廣、加上地處偏遠交通不便，因此至今尚有多處災區未能妥善安置與調查整治。此次地震出現少見土壤液化引致長距離地滑(liquefaction-induced long-distance slides)，其中最嚴重地點發生在帕盧市的Petobo地區，也是本研究對象。

在此地震造成各地盤滑動事件中，Petobo的滑動面積為1.64 Km<sup>2</sup>，居第二、僅次於Jono Oge；然而其滑動距離遠(>800m)、災損最為嚴重(估計>3300棟房屋毀損及~2000人死亡)。這些長距離的地盤滑動事件有共同特點，包括原地表坡度平緩(約<3°或<5%)且滑動區上緣皆緊鄰灌溉渠道等。雖此，至今對於滑動原因與機制仍有諸多揣測、未能定論。本研究成員到現場進行勘查，同時地質鑽探、並取樣試驗等，祈能對此液化滑動之原因與機制有更

深入了解。本文為Petobo地區現地踏勘調查結果之前半部(Part I)，說明地表觀察與地形地物變動；至於當地災民訪談與滑動地微分區等，將另文(Part II)說明。

## 二、背景

本節首先對於研究區之環境背景進行說明，包括地質、地下水、地震歷史、以及前期土壤液化研究等之回顧。

### 2.1 地質環境

如圖一，本研究區位於印尼蘇拉維西島(Sulawesi)中部(中蘇拉維西省)的首府帕盧市(Palu)與其附近地區；該地區之基岩與地表沉積分佈如圖二。

在研究區周遭50~100Km範圍內(圖二(a); Watkinson, 2011; GEER, 2019)，Palu市研究區落於寬度約8Km之斷層帶上，此處基岩屬於全新世(Holocene; 1萬年前)沉積岩。在斷層帶東側沿著帕盧灣，則屬中新世(Miocene; 25百萬年前)與始新世(Eocene; 54百萬年前)沉積岩。而該沉積岩之東側區域則為三疊紀(Triassic; 225百萬年前)變質岩。

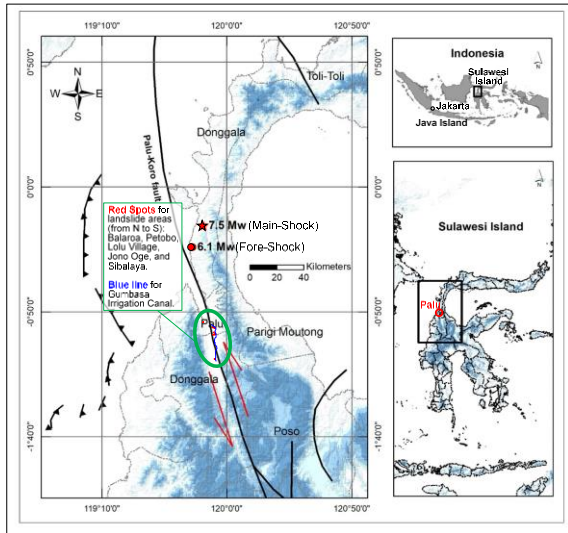
研究區所處斷層帶西側、沿帕盧灣及其更西區域，為中新世(Miocene; 25百萬年前)與白堊紀(Cretaceous; 135百萬年前)沉積岩。

上述斷層帶與其兩側沉積岩或變質岩的南方，則屬上新世(Pliocene; 7百萬年前)火成岩(花崗岩)。

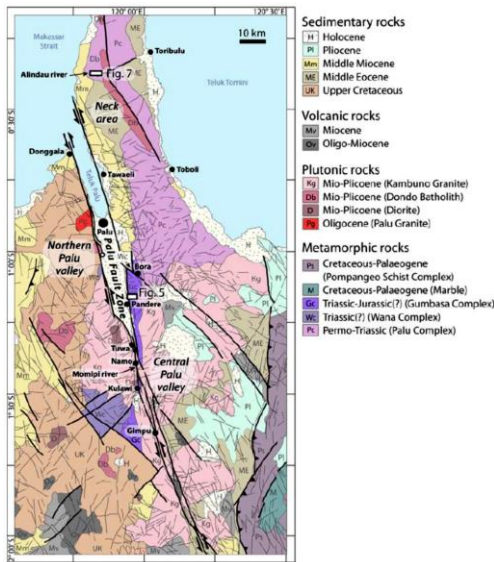
就地形而言、如圖一，帕盧研究區落於縱向斷層帶之谷地，其北側為峽灣、東西側為高山；東側高度約1000至2000m、西側高度則約1500至3000m。

帕盧谷地及其鄰近區域之地表沉積物受基岩類別與其風化崩積或沖積影響、同時與流經斷層帶谷地之帕盧河長期沉積有關；沉積物之分佈如圖二(b) (Hanifa, 2018; Thein et al., 2014; GEER, 2019)。

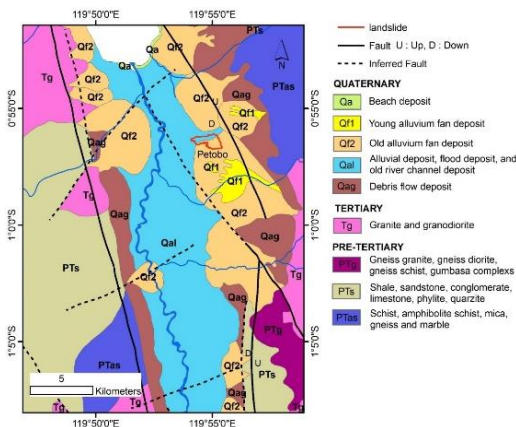
斷層帶內沿著帕盧河之谷地沉積物(Qal; river channel and flood deposits)主要為河流搬運與氾濫所造成之沉積土壤，包含大量黏土、粉土與細砂。



圖一 2018.9.28 印尼 Palu 地震與災害位置圖 (Base Map: Cipta et al., 2016 ; Upomo et al., 2020)



(a) Palu 地區地質環境背景-基岩分佈 (Watkinson, 2011; GEER, 2019)



(b) Palu 地區地質環境背景-地表沉積 (Hanifa, 2018; Thein et al., 2014; GEER, 2019)

圖二 Palu 地區地質環境背景

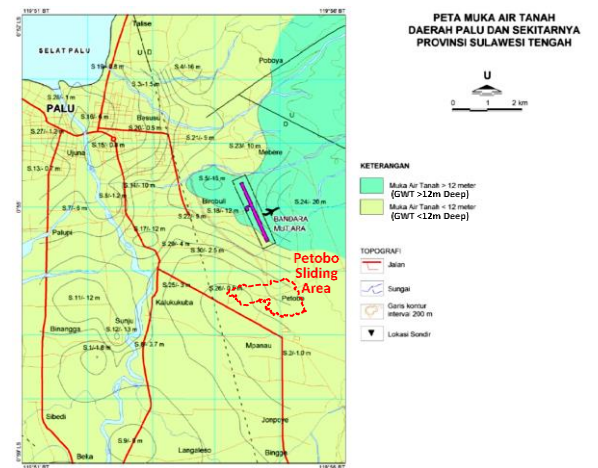
在此谷地沉積之兩側，緊鄰高山下緣，則為受基岩風化崩落與沖積之土壤，包括新/舊沖積扇沉積 (Qf1/Qf2 ; alluvial fan deposits) 與土石崩積 (Qag ; debris flow deposits)。

新舊沖積扇沉積 Qf1/Qf2 分佈在帕盧河谷地兩側，形成一系列扇形區域；屬於粗-細土壤 (礫石/粗砂-細砂/粉砂) 交疊之互層構造。

土石崩積 Qag，在 Qf1/Qf2 外圍、連接兩側高山。崩落土石粗顆較粗，大都源自高山基岩材料 (Tg/火成岩：花崗岩 granite、花崗閃長岩 granodiorite；PTm/變質岩：片岩 schist、片麻岩 gneiss、大理岩 marble；PTs/沉積岩：頁岩 shale、砂岩 sandstone、石灰岩 limestone)。

帕盧地區地表沉積土壤厚度介於 25~125m 間，且接近河道與海灣處則相對較厚。至於 Petobo 滑動區之土壤其厚度約在 25~50m (Thein et al., 2014; GEER, 2019)。

圖二 (b) 亦顯示此地震所造成多處液化滑動位置，似乎皆落於帕盧河道沉積 Qal 與舊沖積扇 Qf2 交界，同時滑動區上緣也緊鄰當地灌溉渠道 (Gumbasa Canal)；說明這些液化滑動應與沖積/沉積材料轉變以及灌溉渠道有密切關聯。



圖三 Palu 地區地下水位分佈 (Widyaningrum, 2012; PuSGeN, 2018)

## 2.2 地下水分佈

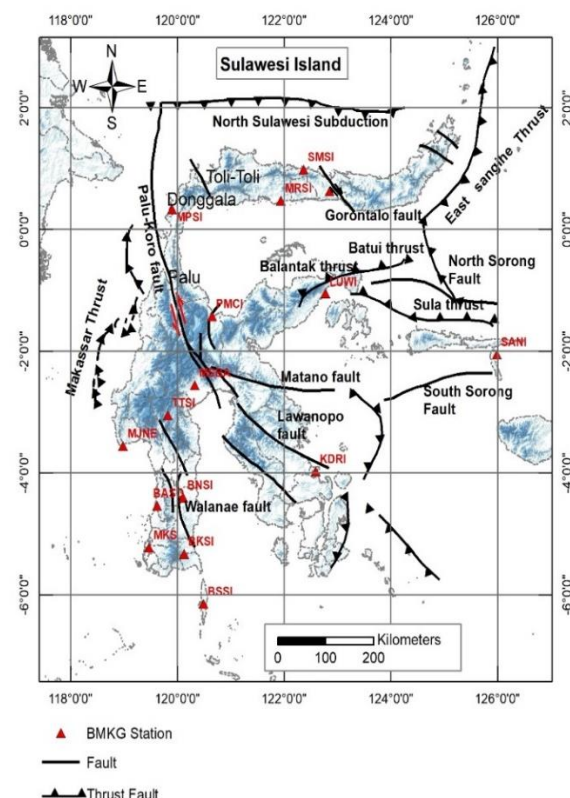
研究區之常時地下水位分佈如圖三所示 (Widyaningrum, 2012 ; PuSGeN, 2018)。可看出 Petobo 滑動區水位約在地表下 7m 以

內；其東側(滑動頂部)較深、約在地表下6m，西側(滑動趾部)較淺、約地表下2m以內。滑動區北方約1Km為帕盧機場，該區域地下水位普遍較深(>12m)。此地震曾造成機場跑道龜裂，但機場內並無明顯土壤液化現象發生。

值得一提，前述之Gumbasa灌溉渠道，亦流經Petobo滑動區東緣。由於此灌溉渠道並無完善襯砌，渠道引水可能因此滲入地盤、而影響該區域局部土壤含水與水位變化。

### 2.3 斷層構造與地震歷史

蘇拉維西島位於歐亞陸板塊邊緣，其東北側受菲律賓海板塊推擠、並隱沒入歐亞陸板塊，其東南側則受澳洲陸板塊之對撞、亦部分隱沒入歐亞陸板塊。在此三板塊衝撞地區(triple junction)，形成非常複雜地質構造與斷層分佈，如圖四所示(Cipta et al., 2016; BMKG, 2018; Upomo et al., 2020)。



圖四 Sulawesi地區板塊與斷層分佈 (Cipta et al., 2016; BMKG, 2018; Upomo et al., 2020)

目前蘇拉維西島確定有50條活動斷層，包含若干逆衝與橫移斷層。其中，穿越蘇拉維西島中部約300Km長、沿NNW-SSE方向之

Palu-Koro橫移斷層為該島主要地質構造，亦是此次地震之觸發斷層。由於受到其東南方澳洲陸板塊擠壓影響，Palu-Koro斷層呈左移(sinistral)錯動；依GPS量測結果顯示斷層滑移速度約4 cm/year (Soquet et al., 2006; PuSGeN, 2018)。

中蘇拉維西島為地震活躍地區；歷史記載由Palu-Koro斷層錯動造成致災地震分別發生於1907、1909、1937與2012。古地震調查亦發現該斷層錯動年代可追溯至1468與1338；估計該斷層錯動之回歸期約130年(Daryono, 2016; PuSGeN, 2018)。

### 2.4 前期液化研究

過去地震事件中，蘇拉維西島曾發生多次土壤液化現象。印尼地質調查局(Badan Geologi)於該地區進行土壤液化調查，採用方法包括定性與定量法(Widyaningrum, 2012)。定性法依據土壤材料、地質年代、與地下水位進行土壤液化潛能判斷(假設M7.5地震)，定量法則依據SPT-N或CPT-qc法進行各地層深度抗液化安全係數計算、再依Iwasaki深度加權估計地盤液化潛能(liquefaction potential index; LPI)。

評估結果如圖五(Widyaningrum, 2012; PuSGeN, 2018)，說明Petobo滑動區之西半部屬於高度液化潛能。然而，滑動區東半部並未在評估範圍，該地區之液化潛能則尚未知曉。

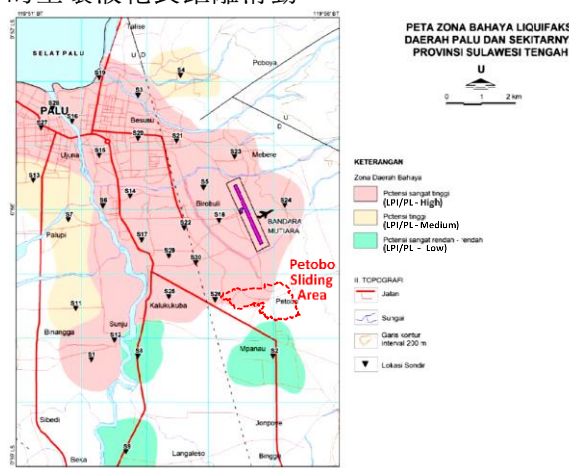
## 三、2018.9.28印尼地震事件

### 3.1 地震規模與震度

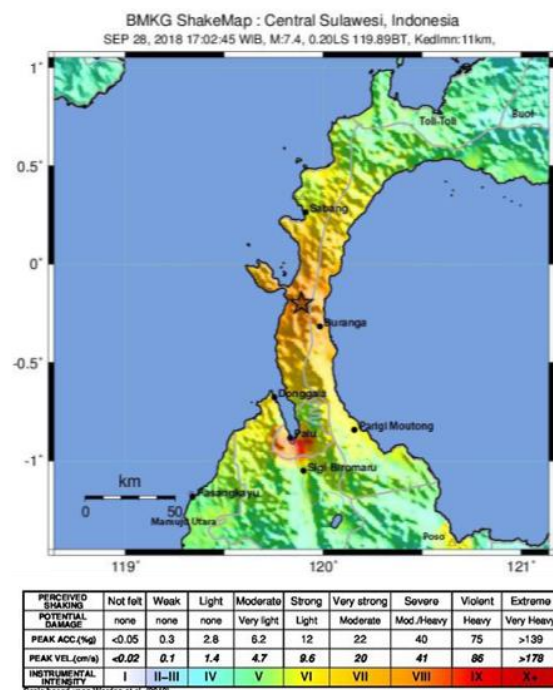
此次Palu-Donggala印尼地震發生於2018年9月28日、當地時間18:02:44。震央距離帕盧市北方約70Km、深度約10Km、位於Palu-Koro斷層(PuSGeN, 2018; USGS, 2018)。地震規模 $M_w$ 7.5、並造成地表強烈震動。如圖六，Palu地區震度高達IX-X( $PGA > 750gal$ ; PuSGeN, 2018)。

主震發生前數小時已發生一系列前震，其中以3小時前、規模 $M_w$ 6.1的前震最大(震央在主震之西南側；圖一)，但並無產生明顯災情。主震後亦有許多餘震；於五天內共發生40起規

模 $M_w$ 4.4以上地震，其中以主震結束後12min規模 $M_w$ 5.8之餘震最大 (USGS, 2018)。這些餘震似乎有助於主震結束十數分鐘內所產生的土壤液化長距離滑動。



圖五 Palu 地區前期土壤液化潛能分析 (Widyaningrum, 2012; PuSGeN, 2018)

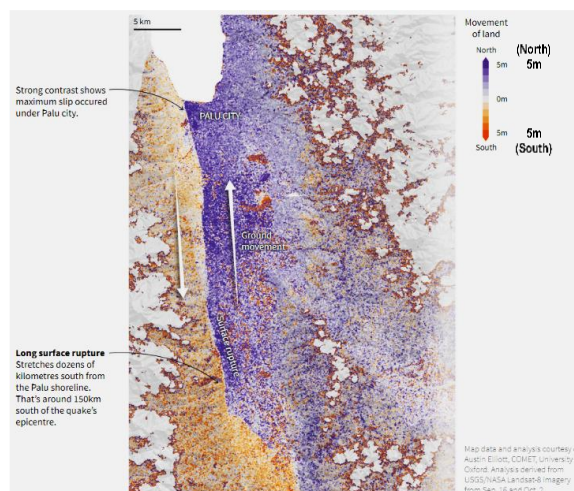


圖六 2018.9.28  $M_w$ 7.5 Palu-Donggala 地震等震度圖 (PuSGeN, 2018)

### 3.2 地表錯動

依據USGS/NASA Landset-8衛星於2018年9/16與10/2影像比對發現、如圖七，Palu-Koro斷層錯動造成其東側地盤北移約5m、西側地盤則南移2m，造成約7m之相對錯動 (Reuters, 2018)；估計地表錯動長度達150Km

(GEER, 2019)。斷層錯動亦造成東側板塊下沉、西側板塊相對上升 (PuSGeN, 2018)。



圖七 2018.9.28 Palu-Donggala地震造成地表錯動 (Reuters, 2018)

### 3.3 災害統計

本次地震除引發帕盧灣海嘯外，於內陸地區亦造成多處大規模的土壤液化滑動現象，其位置如圖一。帕盧灣海嘯高達3~11m，影響區域涵蓋1~2Km以內之沿岸、以及帕盧河兩側0.5~1km範圍 (PuSGeN, 2018; Reuters, 2018)。發生大規模土壤液化滑動區約有五處(圖二(b))，自北往南分別為：Balaraoa(0.40 Km<sup>2</sup>)、Petobo(1.64 Km<sup>2</sup>)、Lolu Village(0.22 Km<sup>2</sup>)、Jono Oge(2.09 Km<sup>2</sup>)、與Sibalaya(0.53 Km<sup>2</sup>) (GEER, 2019)。

依據中蘇拉維西省政府統計，此地震造成各縣市地區之災損、如表一所示；全部死亡人數超過4,400人、房屋毀損達100,400棟，經濟損失達15.6億美金或458億台幣 (CSPG, 2018)。

表中可以看出帕盧市在四個受影響行政區中之傷亡最多與房損最大。而帕盧市地震災害主要發生在峽灣沿岸受海嘯侵襲區，以及Petobo與Balaraoa兩處之土壤液化滑動區；其中又以Petobo地區更為嚴重，估計>3300棟房屋毀損及~2000人死亡 (GEER, 2019)。

### 3.4 相關研究文獻

地震發生後，印尼國家地震研究中心隨即公佈初勘結果 (PuSGeN, 2018)；國際間若干團體也陸續抵達進行勘災調查。美國團隊發現滑動區地表多處噴砂，同時其上緣灌溉渠道並

未襯砌，可能造成局部區域水位攀升 (GEER, 2019)。日本團隊觀察到滑動區中段與趾部多處積水並有自流井，懷疑地盤內有受壓水層，其封層因滑動受損產生向上水流而助於長距離地滑現象 (Kiyota et al., 2020; Hidayat et al., 2020)。

表一 2018.9.28印尼地震災損統計 (Source: Central Sulawesi Provincial Government, 2018.12.20)

Fatality Category	城市/地區(郡)			
	Palu	Sigi	Donggala	Parigi Moutong
Died	2,132	289	249	15
Missing	531	116	54	0
Buried	1,016	0	0	0
Sum:	3,679 (83.58%)	405 (9.20%)	303 (6.88%)	15 (0.34%)
Total fatalities: 4,402				
House Damage	城市/地區(郡)			
	Palu	Sigi	Donggala	Parigi Moutong
Light	17,293	10,612	7,989	4,191
Medium	12,717	6,480	6,099	826
Heavy	9,181	13,144	7,290	533
Vanished	3,673	302	75	0
Sum:	42,864 (42.69%)	30,538 (30.41%)	21,453 (21.37%)	5,550 (5.53%)
Total house damages: 100,405				

Note-1: Central Sulawesi Provincial Government, Finalization Data and Information Report for Earth Quake, Tsunami, and Liquefaction Disaster in Central Sulawesi Province, 20 December 2018. ([https://www.Humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/lap\\_ke\\_gub\\_20\\_des\\_2018.pdf](https://www.Humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/lap_ke_gub_20_des_2018.pdf))

Note-2: Palu災損地區包括Palu灣沿岸受海嘯襲擊區域、Petobo地滑區、以及Balaroa地滑區。

Note-3: Sigi災損地區包括Lolu Village地滑區、Jono Oge地滑區、以及Sibalaya地滑區。

此外尚有部分團體勘察發現，位於滑動區上緣的灌溉渠道(Gumbasa Canal)以及廣佈滑動區的水田(paddy fields)對大規模的液化滑動應有密切關係 (Bradley et al., 2019; Cummins, 2019; Watkinson & Hall, 2019)。

以上說明目前有關液化滑動原因大都指向地層內之地下水，然而對於如何造成高地下水壓、及如何產生長距離滑動之原因等仍諸多揣測。為對事實真相有更多了解，以下研究乃著手進行。

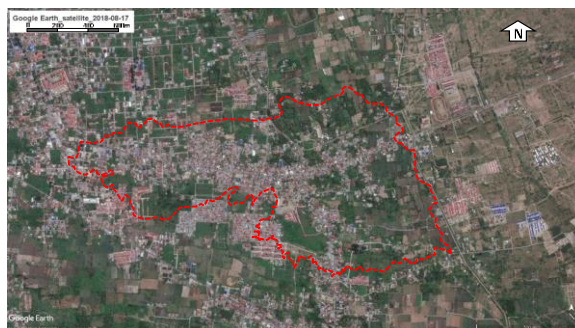
## 四、滑動區現地踏勘

本研究團隊分別於2019年8月與2020年1~2月期間到Petobo滑動區進行調查；由於印尼政府於震後，除遷移安置災民外、尚未對災區進行整治作業，因此Petobo地表災情並無顯

著改變。本研究現地踏勘結果分別以地貌整體變化、地物滑動前後比較、以及地形差異分析等進行說明；至於當地居民訪談、地表特徵與劃分等將留待Part II說明。

### 4.1 地貌變化

Petobo地滑區地貌變化可利用不同時段的Google衛星影像說明。如圖八，地震前滑動區東半部與南側多為水稻田，住宅區則密集於東西向主要道路以及滑動區之中段與西側。地震顯然擾動東側地盤、並往西移動，除帶走中段地物外、並沖垮西區之房宅。



(a) 2018.08.17 Pre-slide Image (約1個月前)



(b) 2018.10.02 Post-slide Image (約1週後)



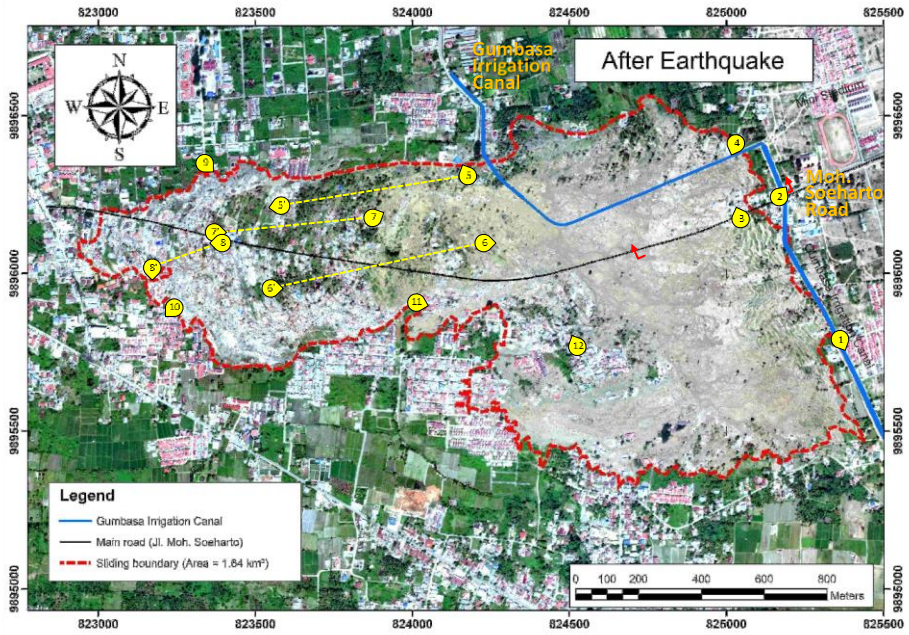
(c) 2019.05.23 Post-slide Image (約8個月後)

圖八 2018.09.28地震前後Petobo地區地貌演變

### 4.2 地物改變

於Petobo災區停駐期間所觀察到地物變化說明如下。圖九上側為12處代表地物之編號

7 張睦雄等：2018.9.28印尼Palu-Donggala地震Petobo地區土壤液化引致地層滑動事件之現地踏勘(I)



圖九 2018.09.28地震前後Petobo地區地物分佈與變動比較

與分佈。其中，編號5~8地物受地震與滑動影響產生大規模位移，其餘地物則大致仍在原處；滑動前後地物照片拍攝方向如圖中編號之指向所示。圖九下側則為各地物之滑動前後照片；滑動前照片取自於Google街景，滑動後照片則為本研究團隊於2020年1~2月期間現地所拍攝。此外，各照片拍攝位置座標亦註記於照片下方。

編號(1)(2)地物為滑動區東緣之Gumbasa Canal，為滑動區農作稻田之主要水源。該渠道並未襯砌、且平時均約八成滿水；地震造成地面龜裂與滑動、渠水流失。編號(3)(4)地物分別在滑動區東側與東北角；可看出地盤嚴重斷裂、傾斜與滑移，明顯為土壤液化造成之側向擴展現象(lateral spreading)。

編號(5)~(8)地物位於滑動區中部與西部，地震引發地盤滑動將這些地物帶離原位(向西)達250~700m之遠。其中某些地物雖隨地盤滑移，整體結構尚稱完好，如編號(6)清真寺；某些則受流動地盤推擠造成斷裂或毀損，如編號(8)之民宅。這些景象說明地物所處的地盤已經歷長距離的土壤液化流動。

編號(9)~(12)地物分散於滑動區趾部與南側區域。這些地物均座落於土壤液化產生土石流動體之邊緣，明顯看出土石堆積高度達3~6m。



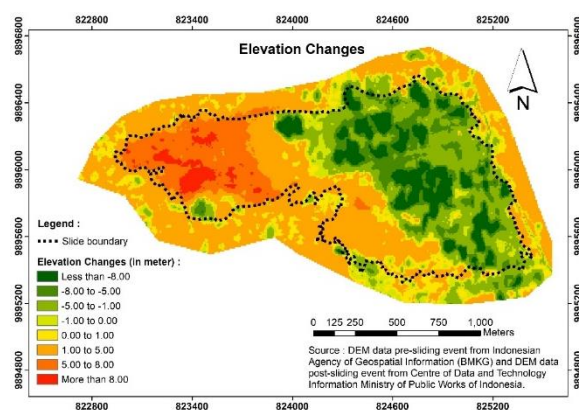
圖十 2018.9.28地震造成Petobo地區地表水平位移

### 4.3 地形分析

由於長距離地盤流動將造成地形差異，本研究利用高程與坡度改變探討地形變化。首先利用現地勘查與衛星地圖標定建物，查核該建

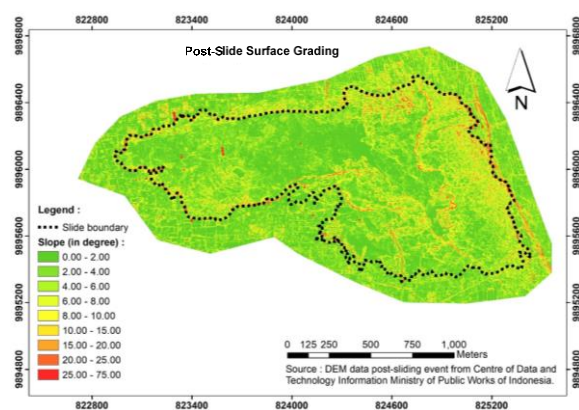
物地震前後位置，並建構位移向量、如圖十。可看出滑動東區約300m帶寬地物移動距離 $\leq 200m$ ，中段移動距離500~1000m，至於西側約800m範圍移動距離則 $\leq 400m$ 。

圖十一說明滑動區地震前後之高程變化。相較於前圖，滑動東區約300m帶寬地表普遍下沉3~7m，滑動區中段由東往西方向地表由下沉 $>7m$ 、逐漸改為上升1~4m，至於西側約800m範圍地表則普遍抬升4~10m。



圖十一 2018.9.28地震造成Petobo地區地表高程變化

圖十二為滑動區地震後之地表坡度變化。可看出前述之滑動區東側約300帶寬，地表坡度密集變化，此應與土壤液化側向擴展之影響有關。至於中段主要滑動區地表坡度相對平緩，說明地盤土壤液態化的結果。西側約800m範圍則因土石推擠與堆積再次形成部分粗糙地表情況。



圖十二 2018.9.28地震造成Petobo地區地表坡度變化-震後地表



## 五、結語

本文說明2018.9.28印尼地震於Petobo地區土壤液化引致之地盤滑動。除介紹環境背景與地震事件外，本文說明現地踏勘之部分結果，包含滑動區地貌、地物與地形之改變。至於有關災民訪談、地表特徵與劃分、以及結論等將於下一篇Part II說明。

## 誌謝

本文為雲科大(YunTech)與印尼三寶瓏州立大學(Unnes)之研究成果。研究期間萬大土壤技術顧問魏元聖先生無條件提供落錘能量檢測儀器，在此致謝。本文感謝台大翁作新教授、中央地調所劉桓吉博士、亞新工程顧問王劍虹技師對研究內容提供寶貴意見。雲科大國合處與營建系提供部分經費補助，在此亦表謝意。

## 參考文獻

- 盧志杰、黃俊鴻、柯永彥、倪勝火 (2019), 「2018日本北海道地震防災摘要報告」, 地工技術, 第162期, 第73-84頁。
- BMKG (National Meteorological, Climatological and Geophysical Agency of Indonesia) (2018). Ulasan guncangan tanah akibat gempa bumi Donggala 28 September 2018. <https://www.bmkg.go.id/berita/?p=ulasan-guncangantanah-akibat-gempabumi-utara-dongga-la-sulteng-28-september-2018&lang=ID&tag=ulasan-guncangan-tanah>. (in Indonesian)
- Bradley, K., et al. (2019). "Earthquake-triggered 2018 Palu Valley landslides enabled by wet rice cultivation." *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0444-1>
- Central Sulawesi Provincial Government (CSPG) (2018). Finalization Data and Information Report for Earth Quake, Tsunami, and Liquefaction Disaster in Central Sulawesi Province. [https://www.humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/lap\\_ke\\_gub\\_20\\_des\\_2018.pdf](https://www.humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/lap_ke_gub_20_des_2018.pdf)
- Cipta, A., Robiana, R., Griffin, J.D., Horspool, N., Hidayati, S., Cummins, P.R. (2016). "A probabilistic seismic hazard assessment for Sulawesi, Indonesia." Geological Society of London, UK, Special Publications, No.441, pp.133-152. <https://doi.org/10.1144/SP441.6>
- Cummins, P.R. (2019). "Irrigation and the Palu landslides." *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0467-7>
- Daryono, M.R., (2016). Paleoseismology Tropis of Indonesia. PhD Dissertation Institut Teknologi Bandung, Indonesia. (in Indonesian)
- Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER) (2019). Geotechnical Reconnaissance: The 28 September 2018 M7.5 Palu-Donggala, Indonesia Earthquake.
- Hanifa, R. (2018). GEER-HATTI-PuSGeN Joint Survey on Palu Earthquake 2018. Presentation, Indonesian Ministry of Research, Technology and Higher Education, Jakarta, Indonesia, November 12, 2018.
- Hidayat, R.F., Kiyota, T., Tada, N., Hayakawa, J., Nawir, H. (2020). "Reconnaissance on liquefaction-induced flow failure caused by the 2018 Mw7.5 Sulawesi earthquake, Palu, Indonesia." *J. Eng. Technol. Sci.*, 52(1), 51-65.
- Kiyota, T., Furuichi, H., Hidayat, R.F., Tada, N., Nawir, H. (2020). "Overview of long-distance flow-slide caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia." *Soils and Foundations*. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.03.015>
- Kobayashi, T., Hayashi, K., Yurai, H. (2019). "Geodetically estimated location and geometry of the fault plane involved in the 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake." *Earth Planets Space* 71, 62. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1042-6>
- PuSGeN (National Earthquake Study Center of Indonesia) (2018). Damages Associated with Geotechnical Problems in 2018 Palu Earthquake, Indonesia - A Summary on the Impact of Palu-Donggala Mw 7.4 Earthquake on Urban Area of Palu, Donggala, and Sigi.
- Reuters (2018). Destruction in Palu. <https://fingfx.thomsonreuters.com/gfx/rngs/INDONESIA-QUAKE/010080MZ19R/index.html> (accessed on 2020.8.14)
- Socquet, A., Simons, W., Vigny, C., McCaffrey, R., Subarya, C., Sarsito, D., Ambrosius, B., Spakman, W. (2006). "Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data." *J. Geophys. Res.*, 111.
- Takahashi, H., Kimura, R. (2019). "The 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake and its aftermath." *J. Disaster Research*, 14, Disaster Report: sc20190112. [https://www.u-hyogo.ac.jp/shse/rkimura/19JDRSCO\\_Takahashi.pdf](https://www.u-hyogo.ac.jp/shse/rkimura/19JDRSCO_Takahashi.pdf)
- Thein, P.S., Pramumijoyo, S., Brotopuspito, K.S., Kiyono, J., Wilopo, W., Furukawa, A., Setianto, A. (2014). "Estimation of seismic ground motion and shaking parameters based on microtremor measurements at Palu City, Central Sulawesi Province, Indonesia." *Int'l J. Geolog. Environ. Engrng.*, 8(5), 308-319.
- Upomo, T.C., Chang, M., Kusumawardani, R., Prayitno, G.A., Huang, R.C., Fansuri, M.H. (2020). "An overview study of flowslide liquefaction in Petobo, Palu, Indonesia." *Proc. GeoMEast2020 Conf.*,

10 張睦雄等：2018.9.28印尼Palu-Donggala地震Petobo地區土壤液化引致地層滑動事件之現地踏勘  
(I)

Egypt, 20p.

USGS (2018). M 7.5 - 70km N of Palu, Indonesia. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/executive#executive> (accessed on 2020.8.14)

Watkinson, I.M. (2011). "Ductile flow in the metamorphic rocks of central Sulawesi." *The SE Asia Gateway: History and Tectonics of the Austral-ia-Asia Collision*, Geological Society of London, 355, 157-176.

Watkinson, I.M., Hall, R. (2019). "Impact of communal irrigation on the 2018 Palu earthquake-triggered landslides." *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0448-x>

Widyaningrum, R. (2012). *Geological Investigation on the Liquefaction Potential of Palu Area, Central Sulawesi Province*, Indonesian Geological Agency (BADAN GEOLOGI). (in Indonesian)



## 財團法人土工技術研究發展基金會

發文日期：2020年12月23日

發文字號：地字第1091223072號

睦雄、任中、涂家利、賈立、雷莉、莫漢德先生大鑒：

台端大作『2018.9.28 印尼 Palu-Donggala 地震 Petobo 地區土壤液化引致地層滑動事件之現地踏勘』經送審同意接受，再次感謝您的賜稿。考量時效會盡量於兩期(半年)內刊登，謹此奉達。

「土工技術」為一公益性專業期刊，以發表大地工程領域具技術性、應用性之文章，敬請 台端一本初衷繼續惠賜本刊稿件。

謹此 順祝

撰安



編輯與出版委員會 敬上