

Estimating Soil Properties and Rice Plant Growth in Liquefaction Paddy Land as Affected by Earthquake in Pohang City of Korea

저자 (Authors)	Yong-Seon Zhang, Dong-Jin Kim, Jun-Hong Park, Se-Yeong Choi, Myung-Sook Kim, Hyub-Sung Lee
출처 (Source)	한국토양비료학회지 52(2) , 2019.5, 143-152(10 pages) KOREAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE AND FERTILIZER 52(2) , 2019.5, 143-152(10 pages)
발행처 (Publisher)	한국토양비료학회 Korean Society Of Soil Sciences And Fertilizer
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08735849
APA Style	Yong-Seon Zhang, Dong-Jin Kim, Jun-Hong Park, Se-Yeong Choi, Myung-Sook Kim, Hyub-Sung Lee (2019). Estimating Soil Properties and Rice Plant Growth in Liquefaction Paddy Land as Affected by Earthquake in Pohang City of Korea. 한국토양비료학회지 , 52(2), 143-152
이용정보 (Accessed)	이화여자대학교 203.255.***.68 2020/05/18 03:59 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Estimating Soil Properties and Rice Plant Growth in Liquefaction Paddy Land as Affected by Earthquake in Pohang City of Korea

Yong-Seon Zhang, Dong-Jin Kim*, Jun-Hong Park¹, Se-Yeong Choi², Myung-Sook Kim, and Hyub-Sung Lee

Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

¹Agricultural Environment Research Department, Gyeongsangbuk-do Agricultural Research and Extension Services, Daegu 41404, Korea

²Pohang Agricultural Technology Center, Pohang 37533, Korea

*Corresponding author: gimdj@korea.kr

ABSTRACT

Received: April 24, 2019

Revised: May 14, 2019

Accepted: May 27, 2019

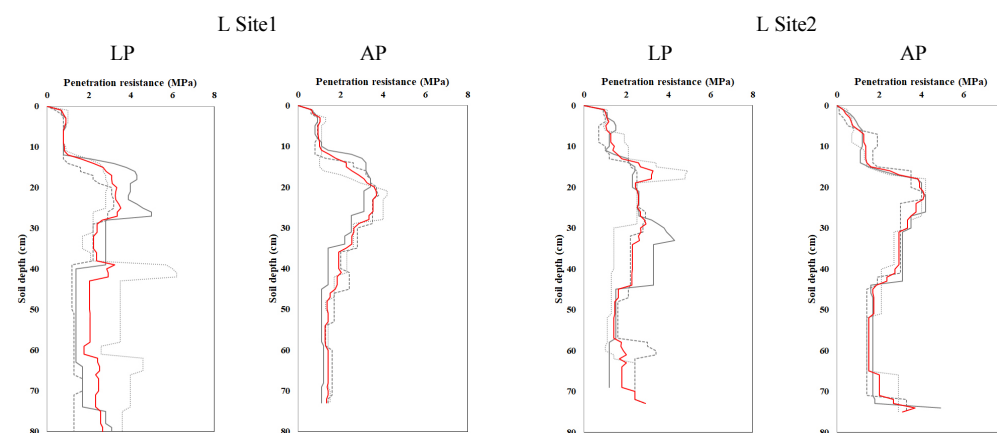
ORCID

Dong-Jin Kim

<https://orcid.org/0000-0001-5828-6732>

On 15th November 2017, an earthquake (magnitude 5.5) occurred at 36.10N and 129.37E on Pohang city in Korea. Due to the earthquake, liquefaction occurred in some agricultural lands of Yongcheon-ri, Heunghae-eup, Buk-gu, Pohang-si, Korea. This study investigated the physical and chemical properties of soil and liquefied sand and crop growth in the liquefaction site as affected by earthquake. The scale of liquefaction site in the experimental paddy was 30 - 50 cm ellipse, and most of the sand mixed with 14 - 22% of the gravel was piled up. The liquefaction scale was less than 0.01% of the area in each paddy land. The pH of the liquefied sand was a suitable property for rice cultivation, and heavy metal contents were lower than the concern level of soil environmental conservation act. As a result of comparing the liquefaction point (LP) and the around point 30 cm (AP) away from the LP, the partial cracked line was verified in the profile of LP. However, the soil structure maintained with the soil penetration resistance of 3 MPa or more. As the scale of sand liquefaction was small and the soil structure maintained, it considered that there was no problem in water and nutrient movement of soil and farming work. The effects of liquefaction on the growth and yield of rice were estimated to be insignificant because there was no statistically significant difference in plant height, stem height, panicle length, panicle number per fill, grain-filling rate, and yield of rice plants in the liquefaction site and control site.

Keywords: Earthquake, Liquefaction, Paddy land, Pohang city, Soil penetration resistance



The soil penetration resistance of liquefaction sites in Pohang city.

[†]L Site1, liquefaction site 1; L Site2, liquefaction site 2.

[‡]LP, liquefaction point in the liquefaction site; AP, around point 30 cm away from the liquefaction point.



© The Korean Society of Soil Science and Fertilizer. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

액상화(liquefaction) 또는 토양 액상화(soil liquefaction)는 지반이 강한 충격을 받아 공극수압 상승과 토양 유효 응력 감소로 인하여 전단강도를 상실하여 모래가 액체처럼 이동되는 현상을 말한다 (Satyam, 2012; Dobry and Abodoun, 2017; Lashkaril et al., 2017). 액상화는 지진과 지질학적 재해 등의 충격에 의해 발생할 수 있으며 (Ambrasey and Sarma, 1969; Ross et al., 1969; Ishihara, 1993; Wang, 2007; Holzer et al., 2010) 지반침하로 인하여 건물, 도로 등의 파손을 일으켜 경제적 손실 및 인명 피해를 가져온다 (Bao et al., 2016; Hazout et al., 2017; Shivaprakash and Dinesh, 2017). 액상화 현상은 1918년 Hazen (1920)이 캘리포니아의 Calaveras 댐 조성을 위한 흙막이 공사 당시 거둑집에 흙을 넣고 유압 다짐방식으로 성토작업 중 독 상부 경사면이 무너지는 현상을 해석하면서 처음 사용한 것으로 알려져 있다. 1964년 일본 니가타 (Niigata) 모멘트 규모 (Mw, moment magnitude) 7.5 지진 (Iwasaki, 1986), 1989년 미국 캘리포니아 로마 프리에타 (Loma Prieta) Mw6.9 지진 (Sims and Garvin, 1995), 1999년 대만 치치 (Chi-Chi) Mw7.5 지진 (Wang et al., 2003), 2016년 중국 아크토 (Akto) Mw6.6 지진 (Yuan et al., 2019)은 액상화가 발생한 사례로 연구된 바 있다. 일본에서는 토양 액상화 발생 가능성을 액상화지수 (LPI, liquefaction potential index)를 적용하여 판단하고, 액상화 위험 정도를 없음 ($LPI = 0$), 낮음 ($0 < LPI \leq 5$), 높음 ($5 < LPI \leq 15$), 매우 높음 ($15 < LPI$)으로 구분하고 있다 (Iwasaki et al., 1978). 2011년 3월11일 일본 도호쿠 (Tohoku) 대지진 당시 액상화 현상이 도호쿠 (Tohoku)와 간토 (Kanto) 지방에서만 무려 9,680여 지점에서 발생한 것으로 집계되었고 농경지 보리 피해가 보고되었다 (Oyanagi et al., 2012). 2017년 11월 15일 14시 29분 경북 포항시 북구 북쪽 6 km (36.10N, 129.37E)에서 진도 5.5 지진 발생이 보고되었다 (KMA, 2017). 지진이 발생한 포항지역은 신생대 제 3기 (약 7,000 만년 - 약 200 만년 전)에 퇴적해서 이루어진 지질상 제 3기층 (tertiary deposit)으로, 북평, 포항, 영일, 울산 등과 제주도 서귀포에 소규모로 분포한다. 이 지역은 제3기층 중 연일층군으로 주로 포항분지에 분포하는 신생대 제3기의 대표적인 퇴적암 지층이다. 지질층은 기저부의 역암층과 상부의 세일층으로 구분된다. 기저부의 역암층은 두께가 약 200 m 전후이며, 주된 암석은 역암이고 사암과 세일 그리고 드물게는 탄질 세일박층이 협재하고 패류화석이 포함되어 있다. 상부의 세일층은 두께가 약 600 m 내외로 담황색, 담갈색 그리고 담회색의 세일이 대부분이며, 하부 쪽에는 사암과 드물게는 역암이 협재하는 경우도 있다 (Lim et al., 2010). 토양 액상화 발생 가능성은 지하수위가 낮고, 지반이 모래나 미사로 구성되어 연약한 곳에서 지진이나 발파 등의 충격하중에 의한 진동이 있을 때 높은 것으로 알려져 있다 (Mote and Dismuke, 2012). 액상화가 발생할 경우 토양 변화가 수반될 가능성이 높으며, 국내 포항지역에서 지진으로 인한 농경지 액상화 현상이 보고된 바 액상화가 발생한 농경지에 대한 토양조사가 요구되었다. 일본 대지진의 농경지 액상화 현상을 제외하고는 국내외에서 지진으로 인한 액상화 발생 농경지 연구가 부족하여 유익한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 2017년 지진으로 액상화가 발생한 논토양의 물리화학적 특성과 용출모래의 물리화학적 특성 및 중금속 오염 여부를 조사하였다. 그리고 2018년에는 액상화 논토양의 벼 생육과 수량을 조사하였다.

Materials and Methods

연구지점 및 조사 2017년 11월 15일 14시 29분 경북 포항시 북구 북쪽 6 km 지점 (36.10N, 129.37E)에서 진도 5.5 지진이 발생하였다 (KMA, 2017). 포항지진 발생 8일 후인 2017년 11월 23일, 논토양 액상화가 보고된 경북 포항

시 북구 흥해읍 용천리 현장 조사를 실시하였다. 액상화 구역은 Fig. 1에 나타내었고 액상화 현상이 나타난 각 구역을 L Site1 (liquefaction site 1)와 L Site2 (liquefaction site 2)로 구분하였다. 액상화 구역에서 용출모래를 채취하여 자갈 및 모래 조성, 화학적 특성, 중금속 함량을 조사하였고, 액상화 구역에서 액상화가 발생한 지점 (LP, liquefaction point in the liquefaction site) 및 그 주변 30 cm 지점 (AP, around point 30 cm away from the liquefaction point)에 대하여 깊이별 원추관입저항 특성, 자갈 함량 및 토성, 화학적 특성을 조사하였다. 동일 필지내에서도 대형농기계 사용에 따른 토양물리성 퇴화가 심한 지점은 필지 중앙보다는 농기계 속도가 상대적으로 빠른 바깥 지점이어서 본 연구에서는 액상화 발생 지점으로부터 30 cm 부근을 대조지점으로 선정하였다. 또한 토양 액상화가 작물 수량에 미치는 영향을 구명하기 위하여 벼 수확기인 2018년 10월 15일, 경북 포항시 북구 흥해읍 용천리 L Site1 구역과 대조구역 (C Site, control site; 동일 필지내 중앙구역)의 벼 생육 특성 및 표토의 화학적 특성을 조사하였다.

토양 및 벼 생육 조사 토양의 물리화학적 특성은 Soil Survey Laboratory Methods Manual (USDA, 2004)과 토양화학분석법 (NAAS, 2010)에 준하여 분석하였다. 토양단면은 직경 4.5 cm 반원형 비교란 토양시료채취기 (gouge auger)를 이용하여 60 cm까지 채취하였다. 자갈함량은 자갈함량측정방법 (gravel test)을 이용하였으며, 모래 조성 및 토성은 피펫법으로 입정을 분석하여 미국농무부 (United States Department of Agriculture) 기준의 토성삼각도법 (soil texture triangle)에 의하여 토성을 결정하였다. 원추관입저항 특성은 원추관입저항기 (dynamic penetrometer, 06.15 penetrometer, Eijkelkamp, Netherlands)를 이용하여 토양경도를 0 - 80 cm까지 조사하였다. 원추의 각도는 60°이며, 지름은 1 cm 크기를 사용하였으며, 주입 속도는 2 cm sec⁻¹ 이었다. 토양 화학성 분석은 채취한 시료를 풍건쇄토 후 2.0 mm 체에 통과된 것을 분석대상 시료로 하였다. pH와 전기전도도 (EC, electrical conductivity)는 토양을 증류수와 1:5로 혼합하여 30분간 진탕한 현탁액을 pH meter/EC meter로 측정하였다. 토양유기물 (SOM, soil organic matter) 함량은 Tyurin 법, 유효인산 (available phosphate)은 Lancaster 법으로 분석하였다. 치환성양이온



Fig. 1. The survey sites of liquefaction away from the earthquake epicenter in Pohang city.

[†]L Site1, liquefaction site 1; L Site2, liquefaction site 2.

(exch. K, Ca, Mg, Na)은 5 g의 토양시료에 50 ml의 1.0 N ammonium acetate (pH 7.0)를 가하여 30분간 진탕하여 No. 2 여지로 여과 후 유도결합플라즈마분광광도계 (ICP-OES, Integra XL Dual, GBC, Australia)를 이용하여 분석하였다. 용출모래 중 중금속 함량은 환경부에서 고시한 토양오염공정시험기준 (ME, 2017b)에 준하여 분석하였다. 수확기 벼 생육 조사를 위하여 대보 품종을 공시하여 2018년 6월 20일 3.3 m²당 65주를 이앙하였으며 2018년 10월 15일 수확하였다. 수확기 벼 생육 및 수량 조사는 농사시험연구조사기준 (RDA, 2003)에 준하여 실시하였다. 액상화 구역과 대조구역 간 수확기 벼 생육 및 수량의 유의적 차이 검증을 위하여 SAS 통계프로그램을 이용한 t-test (유의수준 5%)를 실시하였다.

Results and Discussion

액상화 현장 및 용출모래 특성 포항지진으로 인한 액상화 현장은 Fig. 1과 같고, 액상화 구역의 토양은 석전 사양토로 하성 충적물로 형성된 점토 18% 미만 사양질 토양으로 토양배수는 약간 불량하고, 토심은 50 - 100cm 정도 이었다. 액상화 구역에서 용출모래 크기와 입자구성은 직경 30 - 50 cm 타원형으로 모래와 자갈이 혼합되어 쌓여 있었으며, 액상화 규모는 각각의 필지에서 면적의 0.01% 미만이었다. 모래용출 부위가 국소적이어서 물 빠짐 등 물리적 영향이 적을 것으로 판단되었다. 2011년 3월 11일 일본 도호쿠 (Tohoku) 대지진 당시 농경지 액상화 규모가 해당 농경지 전체 면적의 12.6%에 이른 것 (Oyanagi et al., 2012)과 대조적으로 포항지진의 영향을 받은 농경지 액상화 규모는 현저히 작다고 할 수 있다. 액상화 두 구역 (L Site1, liquefaction site 1; L Site2, liquefaction site 2)의 용출모래에 대하여 자갈 및 모래조성 특성, 화학적 특성, 중금속 오염 여부를 조사하였다. 자갈 및 모래조성은 Table 1과 같고 자갈함량은 각각 13.8% (L Site1), 22.1% (L Site2)이었으며 모래비율은 세사 (fine sand), 중사 (medium sand), 조사 (coarse sand)가 대부분을 차지하였다. 용출모래의 화학적 특성을 살펴보면 (Table 2), L Site1은 pH가 6.5로서 국립 농업과학원에서 권장하는 작물별 토양특성 기준 (NIAS, 2017)에 적합한 반면, 전기전도도 (2.4 dS m⁻¹)와 치환성 마그네슘 (2.2 cmol_c kg⁻¹)은 권장기준보다 높고 토양유기물 (2 g kg⁻¹), 유효인산 (29 mg kg⁻¹), 치환성 칼륨 (0.1 cmol_c kg⁻¹), 치환성 칼슘 (4.2 cmol_c kg⁻¹)은 권장기준보다 낮은 것으로 나타났다. L Site2는 pH (5.9), 치환성 칼륨 (0.2 cmol_c kg⁻¹), 치환성 칼슘 (5.9 cmol_c kg⁻¹)이 권장기준에 적합한 반면, 전기전도도 (3.5 dS m⁻¹)와 치환성 마그네슘 (2.1 cmol_c kg⁻¹)은 권장기준보다 높고 토양유기물 (9 g kg⁻¹), 유효인산 (26 mg kg⁻¹)은 권장기준보다 낮은 것으로 나타났다. 일본 도호쿠 대지진 당시 발생한 액상화 지점의 분출모래는 pH 3.7 - 5.4, 전기전도도 0.12 - 0.52 dS m⁻¹, 유효인산 12 - 35 mg kg⁻¹, 치환성 칼륨 0.84 - 1.03 cmol_c kg⁻¹로 보고되었다 (Oyanagi et al., 2012). 포항지진 액상화 구역의 분

Table 1. Gravel and sand distribution of liquefied sand in the liquefaction sites.

Site [†]	Gravel	Sand fraction [‡]				
		V.F. Sand (0.05 - 0.10 mm)	F. Sand (0.10 - 0.25 mm)	M. Sand (0.25 - 0.50 mm)	Co. Sand (0.50 - 1.00 mm)	V.Co. Sand (1.00 - 2.00 mm)
	(%)	----- % -----				
L Site1	13.8	3.5	21.1	36.1	29.2	10.1
L Site2	22.1	4.1	35.4	38.2	19.0	3.2

[†]L Site1, liquefaction site 1; L Site2, liquefaction site 2.

[‡]V.F. Sand, very fine sand; F. Sand, fine sand; M. Sand, medium sand; Co. Sand, coarse sand; V.Co. Sand, very coarse sand.

Table 2. Chemical properties of liquefied sand in the liquefaction sites.

Site [†]	pH	EC [‡]	SOM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation			
					K	Ca	Mg	Na
	(H ₂ O, 1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹			
L Site1	6.5	2.4	2	29	0.1	4.2	2.2	0.4
L Site2	5.9	3.5	9	26	0.2	5.9	2.1	0.6
OR [§]	5.5 - 6.5	< 2.0	20 - 30	80 - 120	0.2 - 0.3	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0	

[†]L Site1, liquefaction site 1; L Site2, liquefaction site 2.[‡]EC, electrical conductivity; SOM, soil organic matter.[§]OR, optimal range for cultivating various crops in Korea (NIAS, 2017).**Table 3.** Heavy metal contents of liquefied sand in the liquefaction sites.

Site [†]	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	mg kg ⁻¹						
L Site1	0.5	ND [§]	9.4	ND	8.4	13.9	50.0
L Site2	0.7	ND	10.5	ND	8.2	13.7	47.7
CL [‡]	25	4	150	4	100	200	300

[†]L Site1, liquefaction site 1; L Site2, liquefaction site 2.[‡]CL, Concern level of pollutant concentration in Korea is based on Region 1 which includes upland, paddy, orchard, pasture, mineral spring site, building site, school site, ditch, fish farm, park, historical site, burial and children's playground (ME, 2017a).[§]ND, not detected.

출몰래는 일본 도호쿠 대지진의 분출모래보다 pH와 전기전도도가 높고, 치환성 칼륨은 낮으며, 유효인산은 비슷한 수준이었다. 용출모래의 중금속 오염 여부 결과는 Table 3과 같고, 비소(As), 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 수은(Hg), 니켈(Ni), 납(Pb), 아연(Zn)의 함량은 L Site1과 L Site2 모두 환경부 토양환경보전법의 토양오염우려기준의 1지역 (ME, 2017a)에 현저히 미달하여 중금속 오염 가능성은 없는 것으로 판단되었다.

액상화 지점 및 그 주변 (30 cm) 지점 토양 특성 액상화 지점 (LP, liquefaction point in the liquefaction site) 및 그 주변 30 cm 지점 (AP, around point 30 cm away from the liquefaction point)의 토양 깊이별 원추관입저항을 조사한 결과는 Fig. 2와 같다. 지점에 관계없이 경작 깊이인 15 cm 이내에서 원추관입저항은 지점 간에 차이가 없었다. L Site1에서는 원추관입저항은 토심 15 cm에서 토심 30 cm 사이에서 최대 값이 나타난 후 이하부터는 저항값이 3 MPa 이하로 나타나 Cho et al. (2012)의 연구에서 우리나라 논토양의 표토심이 평균 17.5 cm 인 것과 유사한 특성이라 할 수 있다. L Site2에서는 원추관입저항이 토심 15 cm에서 토심 45 cm까지 매우 두껍게 나타나 심토 경운 및 파쇄 등 다짐층 제거가 시급한 토양으로 조사 되었다. LP와 AP에서 원추관입저항이 높은 지점은 20 cm 깊이였고 LP가 AP보다 상대적으로 낮았으나 2개 지점 모두 20 cm 깊이에서 원추저항 값이 3 MPa 이상이였다. Campbell et al. (1991)에 의하면 1.5 MPa 이상의 관입저항 값을 갖는 경작지에서 뿌리 생육에 영향을 받는다고 하였다. 토양시료채취기 (gouge auger)로 채취한 60 cm까지의 단면 특성은 Fig. 3과 같고, LP와 AP를 비교하면 2개 지점 모두에서 LP 토양단면의 모래 용출에 따른 파열선이 확인되지만 AP와 같은 토양구조를 유지하고 있어 토양양수분 이동, 농기계 작업 및 벼 재배에 문제가 없을 것으로 판단된다. 토양 액상화에 따른 토양 깊이별 자갈함량 및 토성은 Table 4와 같다.

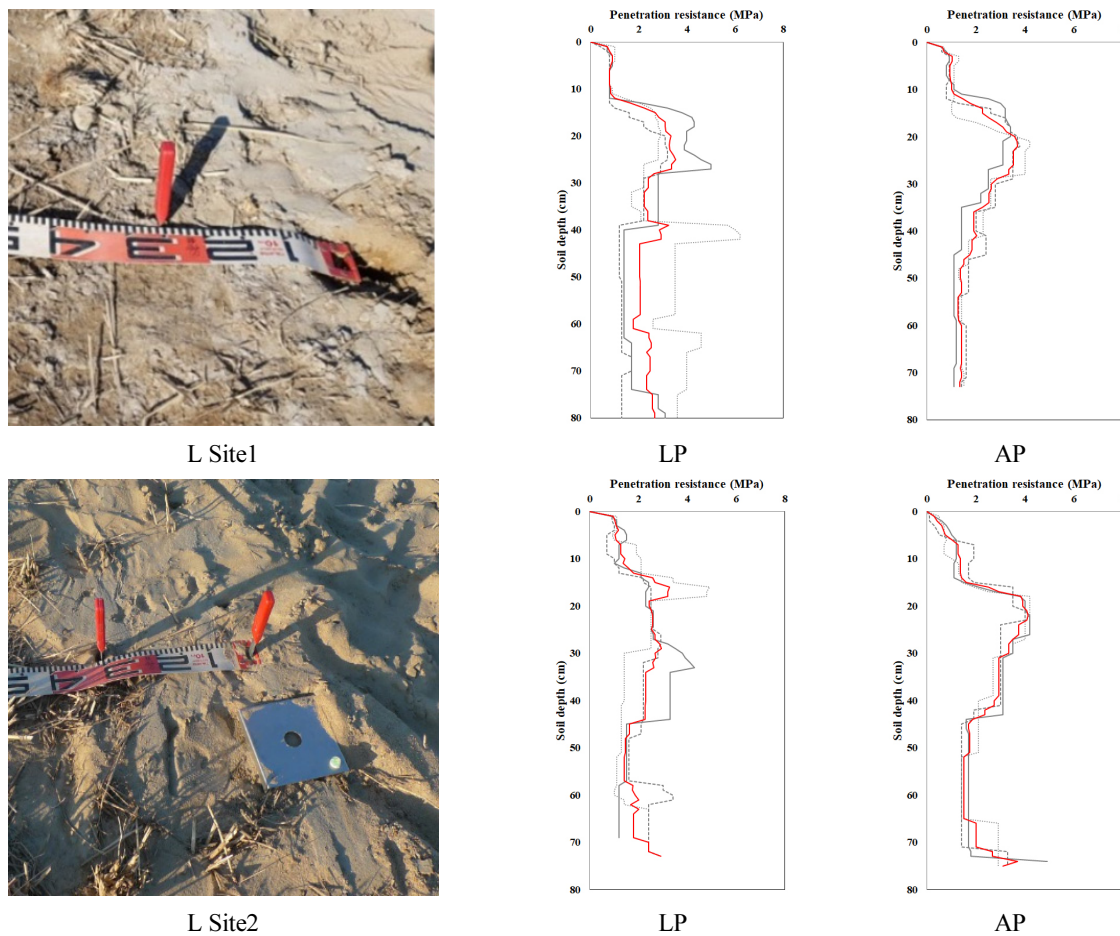


Fig. 2. The soil penetration resistance of liquefaction sites in Pohang city.

[†]L Site1, liquefaction site 1; L Site2, liquefaction site 2.

[‡]LP, liquefaction point in the liquefaction site; AP, around point 30 cm away from the liquefaction point.



Fig. 3. The soil profile properties of liquefaction sites using gouge auger in Pohang city.

[†]L Site1, liquefaction site1; L Site2, liquefaction site 2.

[‡]The soil profile in left gouge auger and right gouge auger collected from LP (liquefaction point in the liquefaction site) and AP (around point 30 cm away from the liquefaction point), respectively, at each site.

Table 4. Gravel content and soil texture of the liquefaction point (LP) and around point 30 cm (AP) away from the liquefaction point at each soil depth in the liquefaction sites.

Site [†]	Survey point [‡]	Depth	Gravel	Particle Size Distribution			Soil texture
				Sand	Silt	Clay	
		cm	%	----- % -----			
L Site1	LP	0 - 20	4.6	56.0	32.0	12.0	sandy loam
		20 - 40	13.8	62.6	28.3	9.1	sandy loam
		40 - 60	22.1	58.4	32.8	8.8	sandy loam
	AP	0 - 20	3.4	61.1	30.2	8.7	sandy loam
		20 - 40	5.3	61.3	32.4	6.3	sandy loam
		40 - 60	6.7	53.6	37.8	8.6	sandy loam
L Site2	LP	0 - 20	6.6	59.7	32.5	7.8	sandy loam
		20 - 40	11.1	66.4	28.6	5.1	sandy loam
		40 - 60	9.5	63.0	31.6	5.4	sandy loam
	AP	0 - 20	4.9	60.0	33.1	7.0	sandy loam
		20 - 40	10.1	67.8	27.4	4.8	sandy loam
		40 - 60	18.3	60.9	34.0	5.1	sandy loam

[†] L Site1, liquefaction site 1; L Site2, liquefaction site 2.[‡] LP, liquefaction point in the liquefaction site; AP, around point 30 cm away from the liquefaction point.**Table 5.** Soil chemical properties of the liquefaction point (LP) and around point 30 cm (AP) away from the liquefaction point at each soil depth in the liquefaction sites.

Site [†]	Survey point [‡]	Depth	pH	EC	SOM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation			
							K	Ca	Mg	Na
			(H ₂ O, 1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	----- cmol _c kg ⁻¹ -----			
L Site1	LP	0 - 20	5.3	0.9	17	61	0.3	5.8	1.8	0.3
		20 - 40	7.3	0.4	7	27	0.1	7.4	1.8	0.3
		40 - 60	7.1	0.5	7	29	0.1	7.1	1.9	0.3
	AP	0 - 20	5.2	0.9	12	45	0.2	5.7	1.8	0.3
		20 - 40	6.6	0.5	7	28	0.1	7.1	2.0	0.3
		40 - 60	6.6	0.3	8	26	0.1	7.8	2.0	0.3
L Site2	LP	0 - 20	5.3	0.6	10	28	0.1	5.5	1.7	0.3
		20 - 40	7.2	0.3	6	22	0.1	6.2	1.7	0.2
		40 - 60	7.1	0.3	6	25	0.1	5.7	2.3	0.2
	AP	0 - 20	5.2	0.7	11	40	0.2	5.3	1.6	0.3
		20 - 40	7.4	0.3	5	24	0.1	6.2	1.7	0.3
		40 - 60	6.7	0.4	6	23	0.1	6.1	1.8	0.3
OR [§]		5.5 - 6.5	< 2.0	20 - 30	80 - 120	0.2 - 0.3	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0		

[†] L Site1, liquefaction site 1; L Site2, liquefaction site 2.[‡] LP, liquefaction point in the liquefaction site; AP, around point 30 cm away from the liquefaction point.[§] OR, optimal range for cultivating various crops in Korea (NIAS, 2017).

토양깊이별 자갈 함량은 L Site1에서 LP가 AP보다 높았으며 L Site2 또한 40 - 60 cm 깊이를 제외하고는 LP의 자갈 함량이 높게 나타났다. L Site1의 LP와 AP, L Site2의 LP와 AP 모두는 모래, 미사, 점토 함량은 유사하여 사양토로 나타났다. 토성 변화에 미치는 영향은 매우 낮았다. 일본의 경우 2011년 도호쿠 (Tohoku) 대지진 당시 액상화 분출 모래로 인하여 요철지형이 형성되는 정도였다 (Oyanagi et al, 2012). 액상화 구역의 LP와 AP의 토양 깊이별 화학성을 살펴보면 Table 5와 같고, 모든 지점에서 표토 pH는 5.2 - 5.3, 전기전도도는 0.6 - 0.9 dS m⁻¹로 유사하였다. 토양유기물과 유효인산은 L Site1에서는 LP에서 높았으나 L Site2에서는 AP에서 높아 일정한 경향이 없었다. 20 - 40 cm 및 40 - 60 cm 깊이에서는 pH를 제외하고 LP와 AP의 특성이 유사하게 나타났다. 구역에 따라 LP와 AP 토양의 화학적 특성은 상이하지만 전반적으로 LP와 AP 토양의 화학적 특성은 유사하였다. 다만 모든 깊이의 토양유기물과 유효인산이 국립농업과학원에서 권장하는 작물별 토양특성 기준 (NIAS, 2017)보다 낮게 나타났다.

액상화 구역 수확기 토양 및 벼 생육 특성 지진의 영향으로 발생한 액상화 현상이 수확기 벼 생육 및 토양 화학성에 미치는 영향을 알아보기 위해 지진 발생 이듬해인 2018년 10월 15일 조사를 실시하였다. 액상화 구역 (L site1, liquefaction site 1) 및 대조구역 (C Site, control site)에서 수확기 벼 생육과 수량을 조사한 결과는 Table 6에 나타내었다. 벼 수량은 L Site1 평균 774 kg 10a⁻¹인 반면 C Site는 797 kg 10a⁻¹로 C Site가 높았으나 유의한 차이가 없었다. 또한 초장 (plant height), 간장 (stem height), 수장 (panicle length), 주당수수 (panicle number per hill), 등숙율 (grain-filling rate)도 L Site1과 C Site2간에 유의한 차이가 없었다. 수확기 당시 표토의 화학적 특성은 Table 7과 같다. L Site1가 C Site보다 pH, 유효인산, 치환성칼슘, 치환성마그네슘은 높고 토양유기물은 낮았으나 뚜렷한 차이는 없었다. L Site1과 C Site 모두에서 pH, 토양유기물, 유효인산, 치환성칼륨은 국립농업과학원에서 권장하는 작물별 토양특성 기준 (NIAS, 2017)보다 낮게 나타났다. 따라서 토양 액상화가 토양 화학적 특성에 미치는 영향은 확인할 수 없었다. Oyanagi et al. (2012)의 보고에 의하면 2011년 일본 도호쿠 (Tohoku) 대지진으로 인한 액상화시 분출한 모래

Table 6. Comparison of rice growth and yield between the liquefaction site and control site in the rice field plot.

Site [†]	Plant height	Stem height	Panicle length	Panicle number per hill	Grain-filling rate	Yield
	cm	cm	cm	ea	%	kg 10a ⁻¹
L Site1	81.2 ± 2.5a	61.3 ± 3.8a	19.5 ± 1.3a	19.5 ± 2.9a	83.9 ± 3.2a	774 ± 85a
C Site	81.7 ± 2.9a	63.7 ± 3.0a	19.6 ± 1.3a	20.9 ± 2.9a	85.3 ± 4.7a	797 ± 102a

[†]L Site1, liquefaction site 1; C Site, control site.

Table 7. Comparison of soil chemical properties between the in the liquefaction site and control site in the rice field plot under harvest period.

Site [†]	pH	SOM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. Cation			
				K	Ca	Mg	Na
	(H ₂ O, 1:5)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹			
L Site1	5.5	11	46	0.1	5.3	2	0.9
C Site	5.2	16	29	0.1	5.2	1.9	0.9
OR [‡]	5.5 - 6.5	20 - 30	80 - 120	0.2 - 0.3	5.0 - 6.0	1.5 - 2.0	

[†]L Site1, liquefaction site 1; C Site, control site.

[‡]OR, optimal range for cultivating various crops in Korea (NIAS, 2017).

가 작물체를 소실시켰고 분출모래의 표고 차이로 요철지형이 최대 26.7 cm까지 형성되어 낮은 지형은 강우 습해로 보리 생육이 불량하였다. 그러나 포항 지진의 영향을 받은 농경지는 액상화 규모가 작을 뿐만 아니라 토양구조 변형 및 토양 화학성 변화 등에 크게 영향을 주지 않아 벼 생육 및 수량에 영향을 주지 않은 것으로 판단된다.

Conclusions

2017년 11월 15일 14시 29분 경북 포항시 북구 북쪽 6 km (36.10N, 129.37E)에서 진도 5.5 지진이 발생하였으며, 지진이 발생한 포항지역은 신생대 제3기에 퇴적되어 이루어진 지질상 제3기층이다. 지진의 영향으로 포항시 북구 흥해읍 용천리 농경지에 액상화 현상이 나타났다. 지진에 의한 토양 액상화가 토양의 물리화학적 특성 및 작물 생육에 미치는 영향을 구명하기 위하여 용출모래와 액상화 구역에 대한 토양의 물리화학적 특성 조사와 수확기 벼 생육 및 수량 조사를 실시하였다. 조사 대상 논에서 액상화 구역의 규모는 직경 30 - 50 cm 타원형으로 자갈 14 - 22%와 대부분이 모래가 혼합되어 쌓여 있었으며, 액상화 규모는 각각의 필지에서 면적의 0.01% 미만이었다. 용출모래의 pH는 벼 재배에 적정수준이었으며, 중금속 함량은 토양환경보전법의 우려기준보다 낮아 중금속 오염 가능성은 없는 것으로 판단되었다. 논에서 액상화 지점과 그 30 cm 주변 지점 토양을 비교한 결과 모래용출 지점의 단면은 모래 용출시 부분적인 파열선이 확인되었지만 관입저항 값이 3 MPa 이상으로 토양구조가 유지되었다. 모래용출 규모가 작고 토양구조가 유지된 것으로 확인되어 토양 양수분 이동, 농기계 작업에 문제가 없을 것으로 판단되었다. 액상화 구역과 대조 구역의 수확기 벼 생육과 수량을 조사한 결과 초장, 간장, 수장, 주당수수, 등숙율, 수량에서 통계적으로 유의한 차이가 없어 액상화가 벼 생육 및 수량에 미치는 영향은 미미한 것으로 추정되었다.

Acknowledgement

This study was financially supported by a grant from the research project (No. PJ012537012019) of National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Ambrasey, N. and S. Sarma. 1969. Liquefaction of soils induced by earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 59(2):651-664.
- Bao, X., B. Ye, G. Ye, and F. Zhang. 2016. Co-seismic and post-seismic behavior of a wall type breakwater on a natural ground composed of liquefiable layer. *Nat. Hazards*. 83(3):1799-1819.
- Cho, H.R., Y.S. Zhang, K.H. Han, H.J. Cho, J.H. Ryu, K.Y. Jung, K.R. Cho, A.S. Ro, S.J. Lim, S.C. Choi, J.I. Lee, W.K. Lee, B.K. Ahn, B.H. Kim, C.Y. Kim, J.H. Park, and S.H. Hyun. 2012. Soil physical properties of arable land by land use across the country. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(3):344-352 (in Korean).
- Dobry, R. and T. Abdoun. 2017. Recent findings on liquefaction triggering in clean and silty sands during earthquakes. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 143(10):04017077.
- Hazen, A. 1920. Hydraulic-fill dams. *Trans. Am. Soc. Civil Eng.* 83:1717-1745.
- Hazout, L., E.A. Zitouni, M. Belkhatir, and T. Schanz. 2017. Evaluation of static liquefaction characteristics of saturated loose sand through the mean grain size and extreme grain sizes. *Geotech. Geol. Eng.* 3:1-27.
- Holzer, T.L., A.S. Jayko, E. Hauksson, J.P.B. Fletcher, T.E. Noce, M.J. Bennett, C.M. Dietel, and K.W. Hudnut. 2010.

- Liquefaction caused by the 2009 Olancha, California (USA), M5.2 earthquake. *Eng. Geol.* 116(1-2):184-188.
- Ishihara, K. 1993. Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Géotechnique*. 43(3):351-451.
- Iwasaki, T. 1986. Soil liquefaction studies in Japan: state-of-the-art. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 5(1):2-68.
- Iwasaki, T., F. Tatsuoka, K. Tokida, and S. Yasuda. 1978. A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan, In: *Proceedings of the second international conference on microzonation*, p.885-896. San Francisco, USA.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2017. http://www.weather.go.kr/weather/earthquake_volcano/report.jsp?prevEqkType=d&eqkType=d&eqk=eqk_web_11_20171115142931.xml&x=23&y=8 (in Korean).
- Lashkaril, A., A. Karimi, K. Fakharian, and F. Kaviani-Hamedani. 2017. Prediction of undrained behavior of isotropically and anisotropically consolidated firoozkuh sand: instability and flow liquefaction. *Int. J. Geomech.* 17(10):1-17.
- Lim, J.D., E.K. Jeong, K. Kim, M. Suzuki, I.S. Paik, and H.M. Kim. 2010. Miocene woods of the Janggi Basin in Korea: Implications for paleofloral changes. *Geosciences J.* 14:11-22.
- ME. 2017a. Soil environment conservation act. Ministry of Environment, Sejong, Korea (in Korean).
- ME. 2017b. Standard analytical methods for soil pollution. Ministry of Environment, Sejong, Korea (in Korean).
- Mote, T.I. and J.N. Dismuke. 2012. Liquefaction hazard maps for Australia. *World Conferences on Earthquake Engineering*. http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_3982.pdf.
- NAAS. 2010. Methods of soil chemical analysis. National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Suwon, Korea (in Korean).
- NIAS. 2017. Fertilization standard on crops. National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju, Korea (in Korean).
- Oyanagi, A., K. Kawaguchi, and T. Murakami. 2012. Damage to barley caused by the boiling sand and wet injury in paddy field in Ibaraki-prefecture after the great east Japan earthquake. *Jpn. J. Crop Sci.* 81(2):212-218 (in Japanese).
- RDA. 2003. Investigation and standard for agricultural experiment. p.323-334. Rural Development Administration, Suwon, Korea (in Korean).
- Ross, G.A., H.B. Seed, and R.R. Migliaccio. 1969. Bridge Foundation behavior in Alaska earthquake. *J. Soil Mech. Found. Div.* 95:190-242.
- Satyam, N. 2012. Review on liquefaction hazard assessment, p.63-82. In: A. Moustafa (ed.). *Advances in geotechnical earthquake engineering-Soil liquefaction and seismic safety of dams and monuments*. In Tech, Hyderabad, India.
- Shivaprakash, B. G. and S.V. Dinesh. 2017. Dynamic properties of sand – fines mixtures. *Geotech. Geol. Eng.* 35(5): 2327-2337.
- Sims, J.D. and C.D. Garvin. 1995. Recurrent liquefaction induced by the 1989 Loma Prieta earthquake and 1990 and 1991 aftershocks: implications for paleoseismicity studies. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 85(1):51-65.
- USDA. 2004. Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigation Report No. 42. Version 4.0. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, USA.
- Wang, C., D.S. Dreger, C. Wang, D. Mayeri, and J.G. Berryman. 2003. Field relations among coseismic ground motion, water level change and liquefaction for the 1999 Chi-Chi ($M_w = 7.5$) earthquake, Taiwan. *Geophys. Res. Lett.* 30(17):HLS1.1-HLS1.4.
- Wang, C.Y. 2007. Liquefaction beyond the Near Field. *Seismol. Res. Lett.* 78(5):512-517.
- Yuan, Y., C. Jie, L. Tao, F. Bo, W. Haoran, L. Yuehua, and J. Hailiang. 2019. Soil liquefaction in seasonally frozen ground during the 2016 Mw6.6 Akto earthquake. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 117:138-148.