

2011년 동일본대지진에 의한 액상화 피해 조사결과

Report of Liquefaction Damage by the East Japan Great Earthquake in 2011

김철호¹⁾, Chol-Ho Kim, 후지이 마모루²⁾, Mamoru Fujii, 오가와 마사히로³⁾, Masahiro Ogawa,
고원호⁴⁾, Wen-Ho Gao

¹⁾ 호코쿠엔지니어링(주) 기술부 기술부장, General Manager, Department of Engineering, Hokoku Engineering Co., Ltd

²⁾ 도카이대학 건축학과 교수, Prof., Department of Architecture and Building Engineering, Tokai University

³⁾ 호코쿠엔지니어링(주) 기술부, Engineer, Department of Engineering, Hokoku Engineering Co.,Ltd

⁴⁾ 도카이대학 건축학과 석사 과정, Master's course, Department of Architecture, Tokai University

SYNOPSIS : The east Japan great earthquake struck from the northeast to the whole area of Kanto with a magnitude of 9.0, maximum seismic intensity 7 (Miyagi Prefecture Kurihara city) on March 11th, 2011. Seismic hazards such as tsunami and liquefaction have especially affected detached houses. Right now, in spite of announcement #1113 of the Ministry of Land, Infrastructure and Transportation which addresses the possibilities of Liquefaction, organized/systematic measure of Liquefaction has hardly been accomplished for detached houses. The authors aimed to investigate and analyze the damage by liquefaction in Urayasu, Chiba Prefecture, where much liquefaction damage has occurred.

Keywords : Earthquake, Liquefaction, Subsidence, Groundwater level, Detached Houses, Urayasu

1. 서 론

2011년 3월 11일 14시 46분경에 발생한 매그니튜드 9.0, 최고 진도 7(미야기현 구리하라시)의 도호쿠 지방 태평양 해역 지진은 도호쿠 지방부터 간토 지방에 이르는 전역에 심대한 피해를 가져왔다.

특히 단독주택의 피해가 컸으며, 지진과 쓰나미에 의한 직접적인 피해(도괴, 유실)는 면했지만 액상화 현상으로 인한 피해를 입은 지역이 있었다. 단독주택을 설계할 때에는 국토교통성 고시(国土交通省告示) 제 1113호에 의거하여 지진 발생 시 액상화현상이 발생하기 쉬운 지반일 경우 건축물에 유해한 변형이나 침하가 발생하지 않을 것을 확인하도록 의무화 되어 있다. 하지만 액상화 대책은 거의 이루어지지 않는 것이 현실상황이다. 그리하여 필자들은 액상화현상으로 인한 피해가 컸던 지바현 우라야스 지역에 착안하여 현지 조사를 실행하였고 이에 보고하는 바이다.

2. 개 요

이번 동일본대지진으로 발생한 액상화로 인한 피해는 아오모리현에서 가나가와현까지 진도 5강 이상을 관측한 지역에서 광범위하게 확인되었다. 특히 수도권의 도쿄연안(東京湾岸) 지역에서 대규모 액상화가 발생하였다. 우라야스시에서는 액상화로 인한 피해자 수 : 96,473명(37,023세대), 액상화 발생 면적 : 약14km²(우라야스시 면적의 약 80% 이상), 모래의 분출량 10~15만m³라고 보고되어 있다. 약 7만 3000채의 집 중 약 3만 3000세대에 상수도, 약 1만 1000 세대의 하수도가 끊기는 등 라이프라인에 큰 피해를 입었다. 응급 복귀가 이루어진 것이 4월 15일로, 복귀에 한달 이상이나 걸렸다. 한신대지진 때에도 고베항의 매립지를 중심으로 대규모 액상

화가 발생했던 매립지 액상화의 위험성이 다시금 확인되었다. 액상화됐던 부분이 재차 액상화하는 재액상화를 방지하기 위해 앞으로 적절한 대책이 필요하다. 우라야스의 매립지 기반에서 앞으로도 일어날 가능성이 있는 액상화 현상에 대한 조사를 실행하고, 이번 액상화 피해 지역을 현지 조사하여 앞으로의 액상화 가능성 정도를 파악하기 위해 그림 1 '우라야스시 지역별 액상화 피해 지역 지도'로 정리하였다.

3. 우라야스 시내의 액상화 피해 상황

3.1 도로 및 보도 등의 액상화 피해

국도 357호에서 도교만 쪽에 있는 제 1기, 제 2기 매립지의 피해가 특히 컸으며 이전부터 있던 비매립지 토지에서는 거의 액상화 현상을 확인할 수 없었다. 사진 1~3은 액상화 현상에 의해 도로와 보도가 붕괴 또는 균열하여 일대가 분출된 모래로 뒤덮힌 상태이며, 사진 4는 우라야스시 히노데 지구에서 보도의 맨홀이 지상으로 돌출된 상태이다.

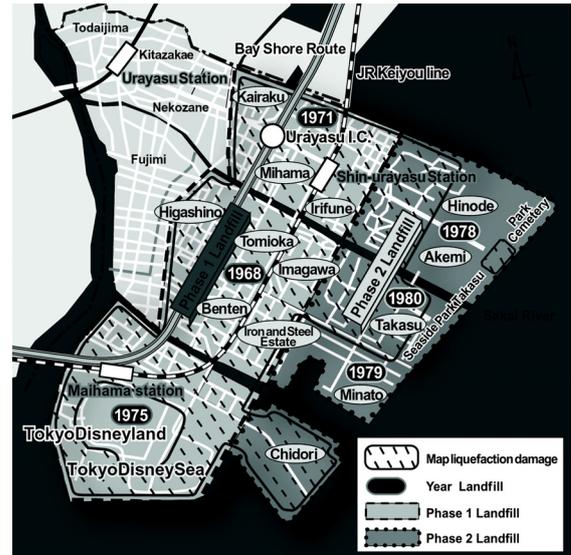


그림 1. 우라야스시 지역별 액상화 피해 지역 지도 (빛금 부분은 액상화가 지표면에 영향을 미친 지역)



사진 1. 보도의 균열에 의해 분출된 진흙에 전봇대가 묻힌 상태 (지도리 지구)



사진 2. 도로의 균열에 의해 진흙이 분출된 상태 (지도리 지구)



사진 3. 제방 쪽의 인도에 보이는 균열에 의한 단층 (이마가와 지구)



사진 4. 인도 위로 돌출된 맨홀 (히노데 지구)



사진 5. 제방 부근의 함몰 (히노데 지구)



사진 6. 가운데가 매립지 경계 부근
(왼쪽이 도카이대학 부속 우라야스 고등학교)

사진 6의 후지미 지구(왼쪽)과 히가시노 지구 (오른쪽)의 경계부에 해당하는 단면도를 그림 2에 게시하였다. 사진의 오른쪽이 히가시노 지구(매립지)이다. 매립지 쪽의 도로는 옛 제방의 독마루 높이에 맞춰 매립조성되어 있다. 계측한 장소는 도카이대학 부속 우라야스 고등학교(오른쪽) 앞이며, 가운데의 옛 제방과의 높이 차이는 약 80cm였다.

액상화 정도의 차이는 극명하여 히가시노 지구(사진 6 오른쪽) 매립지의 인도에서는 액상화에 의한 분사가 확인됐음에도 불구하고, 도로를 끼고 마주보고 있는 비 매립 주택지인 후지미 지구(사진 6 왼쪽)에서는 전혀 액상화의 흔적을 찾아볼 수 없었다.

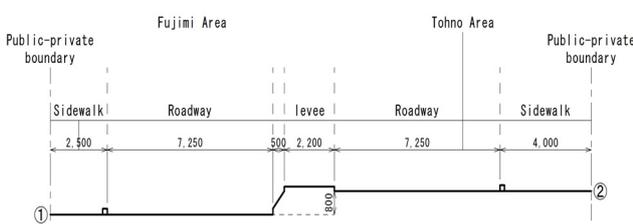


그림 2. 매립지 경계부 단면도
(단면 위치를 그3에 게시함)



그림 3. 매립지 경계부 단면도 위치

3.2 건물의 액상화 피해

액상화에 의한 건물 피해도 도로 및 보도 피해와 마찬가지로 장소에 따라 피해의 차이가 있었다. 사진 7에 분사와 침하에 의해 문 일부가 묻혀 버린 도미오카 파출소, 사진 8에 외벽이 크게 기울어진 지도리 지구의 공장 사진을 게시한다. 두 사진에서 액상화에 의한 침하와 대량으로 분출된 모래를 확인할 수 있다. 조사 지역의 택지에서서도 동일하게 액상화에 의한 침하와 대량으로 분출된 모래가 확인되었다. 세계 최대급인 매그니튜드 9.0, 최대 진도 7, 우라야스 지역에서는 진도 5강의 규모였던 대지진임에도 불구하고 지진력에 의한 우라야스 지역의 건물 손상은 액상화 피해 정도에 비해 작다는 인상을 받았다. 건축물에 큰 피해를 준다고 하는 주기 1~2초의 지진파가 그렇게 강하지 않았다는 것이 지진파 분석으로 판명되었다는 보고가 있다. 진도 7을 기록한 미야기현 구리하라시와 진도 6강이었던 센다이시에서 관측된 주기1~2초의 지진파의 강도는, 약 30만 채가 붕괴 또는 반파했던 한신대지진 때에 비해 20~30%정도의 강도에 불과했다. 이번 지진에 많았던 주기 1초 이하의

지진파가 강하면, 실내의 물건은 흔들리지만 건물에는 영향이 작다고 한다. 그러나 액상화현상에 의한 피해가 컸던 것은 매그니튜드가 큰 지진 특유(特有)의 주기가 길고 큰 진동에 의해 액상화의 발생 범위가 확대된 것이 원인이라고 생각된다. 관측을 통해 300초 가까이 진동이 이어진 기록이 남아 있다. 그림 4에 우라야스시에서 관측된 지진파를 게시한다. 최대 가속도는 157gal, 지진동 계속 시간은 약 5분간으로 오랜 시간 흔들린 것을 확인할 수 있다.



사진 7. 액상화에 의한 부동침하를 볼 수 있는 파출소 (도미오카 지구)



사진 8. 분사와 침하에 의해 기울어진 공장 외벽(지도리 지구)

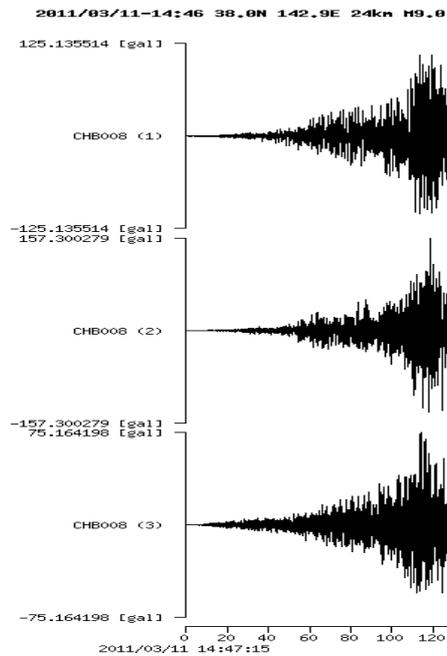


그림 4. 우라야스시 관측 지진파(K-net에 따름)

이리후네 지구에 있는 쇼핑센터는 샌드 컴팩션 파일(Sand Compaction Pile) 공법에 의한 개량을 실시했기 때문에 주변 도로에 분출된 모래의 흔적이 보이기는 했으나 부지 내에 발생한 단층은 경미했다. 그에 비해 아케미 지구에 있는 대형 쇼핑센터는 말뚝을 이용한 보강을 실시하여 건물의 피해는 거의 없으나 주변 지반의 액상화로 인한 침하가 발생하여 커다란 단층이 생겼다. 액상화로 인한 지반 침하에 관해서는 SCP(Sand Compaction Pile) 공법에 따른 지반 개량 쪽이 피해가 적다는 결과가 된다.

주택지에서는 이마가와, 벤텐, 도미오카, 미하마 지구의 피해가 커서 기울어진 가옥도 볼 수 있었다. 이마가와 지구에서는 그림 5와 같이 택지 중앙부를 향해 침하한 상황을 많이 볼 수 있었다. 그러나 벤텐 지구의 공동 단지 내는 피해가 적은 것으로 보였다. 아마도 건설 시에 무언가 지반 개량을 실시한 것으로 생각된다.

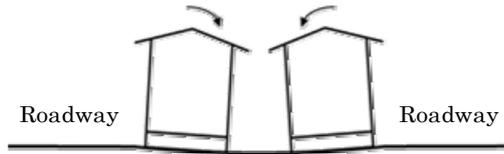


그림 5. 건물 경사 상황

4. 우라야스시의 지반

4.1 우라야스시의 지형

그림 6에 우라야스시 지형 구분도(区分图)를 게시한다. 지역으로서는 우라야스 저지 혹은 우라야스 매립지에 속한다. 주된 지형 구분은 매립지이나 그 이외에도 성토로 조성된 인공 지형을 많이 볼 수 있다.

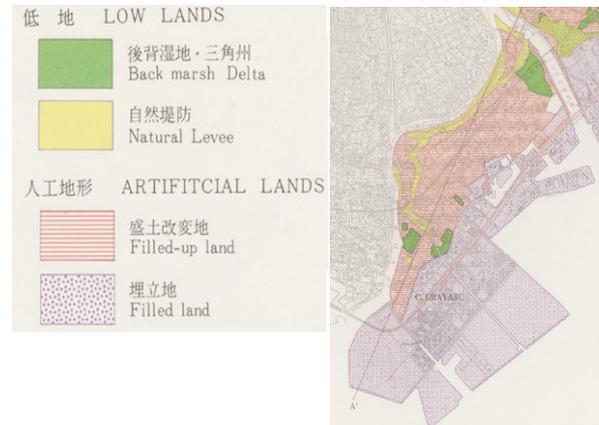


그림 6. 우라야스시 지형 구분도(区分图)

4.2 우라야스시의 지반 데이터

액상화의 피해가 큰 이마가와 지구에서 실시한 스웨덴식 사운딩(SWS) 시험 결과를 그림 7에 게시한다. 건물 건축 전인 2010년 9월과 지진 이후 2011년 4월 5일에 거의 같은 지점에서 시험을 실시한 결과이다. 지진 전의 데이터를 파란색으로, 지진 후의 데이터를 빨간색으로 표시하였다.

SWS 시험이란 원위치에서의 관입저항(지반의 굳기 및 단단한 정도)과 토층 구성 등을 조사하여 지지력을 측정하기 위한 데이터를 얻기 위해 실시하는 시험으로, 단독주택용 지반 조사로 널리 이용되고 있다. 끝에 스크류 포인트를 장착시킨 로드(Rod)의 머리 부분에 1kN 까지 하중을 가해 관입시키고 관입이 멈추면 핸들에 회전을 가해 관입시킨다. 하중에 대한 관입량 그리고 회전수와 관입량을 측정하는 시험이다.

표층부에서 깊이 2m정도까지 다소 단단한 층이 확인되었다. 이것은 매립 조성시의 매토(埋土)로 추정된다. 그리고 매토(埋土) 이상의 깊이에는 연약층이 연속되어 있어 깊이 5.5m까지는 하중을 가하기만 해도 로드(Rod)가 관입되는 상태였다. 아마도 이 연약층이 액상화한 것으로 보인다. 깊이 10m정도에 달하면 견고한 층이 나타나 관입이 불가능해졌다.

비교하면 액상화 전후에 명확한 차이는 확인할 수 없었다. 또한 SWS 시험공을 이용해 교류식 비저항수위계(交流式比抵抗水位計)로 지하수위를 측정된 결과 지표면에서 1.10m라는 상당히 얇은 위치에 있었다.

분출된 모래는 토질 구분으로는 '실트질 모래'이기 때문에 토질 구분상 가까운 것은 시료 번호 P2(깊이 3.15~3.45m) 또는 P4(-5.15~-5.45m)이다. 그러나 지하수와 함께 지상으로 올라오는 동안에 자갈이나 모래 등 입경이 큰 입자는 가라앉기 쉽고, 실트나 점토 등 비표

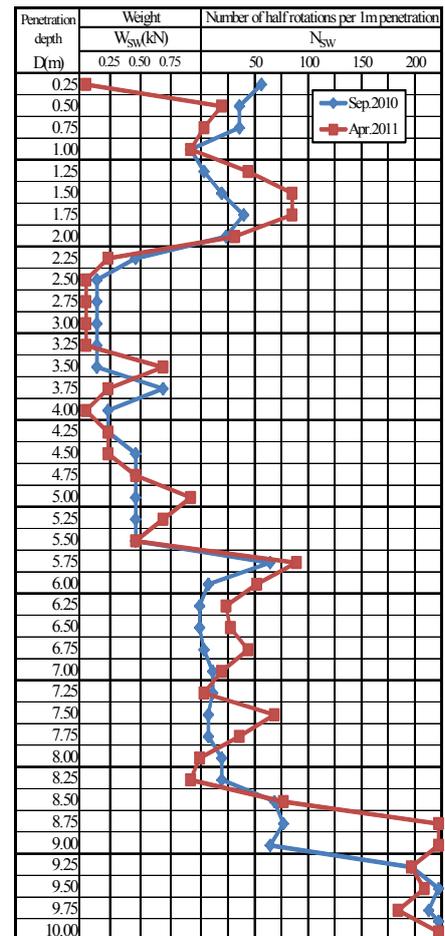


그림 7. SWS 시험 데이터 (우라야스시 이마가와 지구)

표1 유도시험 결과일람

Number of sample	boiled soil	P1	P2	P3	P4	
Sampling depth(GL m)	-	-1.15 ~ -1.45	-3.15 ~ -3.45	-4.15 ~ -4.60	-5.15 ~ -5.45	
Strata	-	Yu-c	Yu-s	Yu-c	Yu-s	
Soil type	silty sand	sandy silt	silty fine sand	sandy silt	silty fine sand	
density of grain	2.695	2.685	2.685	2.690	2.742	
natural water content Wn (%)	20.8	40.2	38.7	47.7	36.9	
b d i g u s t r a t t a i o i n n -	gravel (2 ~ 75mm) %	0.6	0	0.1	0	0.5
	sand(75μm ~ 2mm) %	65.7	38.6	77.5	37.9	76.8
	silt (5 ~ 75μm) %	23.8	53.4	15.9	43	16.2
	clay (5μm ~) %	9.9	8	6.5	19.1	6.5
Soil classification	SF	CsS	SF	CsS	SF	

표 2 세립분 함유율 시험 결과 일람표

Number of sample	boiled soil	P1	P2	P3	P4
Sampling depth(GL m)	-	-1.15 ~ -1.45	-3.15 ~ -3.45	-4.15 ~ -4.60	-5.15 ~ -5.45
Strata	-	Yu-c	Yu-s	Yu-c	Yu-s
Soil type	silty sand	sandy silt	silty fine sand	sandy silt	silty fine sand
Coarse grained portion(%)	66.3	38.6	77.6	37.9	77.3
Fine grained portion(%)	33.7	61.4	22.4	62.1	22.7

Number of sample	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Sampling depth(GL m)	-8.15 ~ -8.45	-10.15 ~ -10.45	-11.15 ~ -11.45	-12.15 ~ -12.45	-14.15 ~ -15.45	-18.15 ~ -18.60
Strata	Yus	Yus	Yuc	Yus	Yc	Yc
Soil type	silty fine sand	silty fine sand	sandy silt	silty fine sand	sandy silt	clayey silt
Coarse grained portion(%)	54.3	91.8	47.9	56	22.9	1.7
Fine grained portion(%)	45.7	82	52.1	44	77.1	98.3

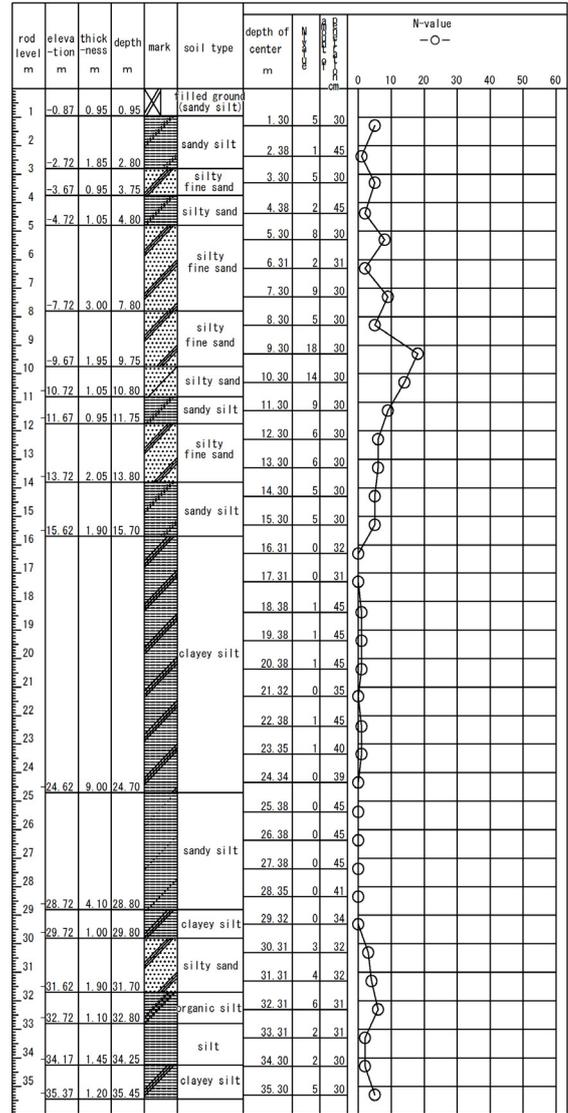


그림8. 이마가와 지구 표준 관입시험 데이터

면적이 큰 입자는 운반되기 쉬운 분급작용을 받았을 가능성이 크다. 따라서 분출된 모래의 점성분이 10% 미만으로 적어진 것은 물과 함께 흘러내려가 분출된 모래는 세립분이 많아진 것으로 생각된다. 도카치 해역 지진에서 발생한 매립지 액상화에서도 실트분을 많이 포함한 분출된 모래가 채취되었으며 이러한 경향은 매립지 액상화로 발생한 분사의 특징이라고 할 수 있다. 이에 관해서는 앞으로 검토를 계속하고자 한다.

그림 8의 표준 관입시험 데이터를 바탕으로 액상화 판정 계산을 실시하였다. 계산에는 중앙개발사제 CKC-Liq 라는 소프트웨어를 사용하였으며, 사용한 설정 조건은 이번 지진의 데이터에서 설정 매그니튜드9, 계측된 최대수평 가속도가 157gal이기 때문에 160gal로 하여 '건축 기초 구조 설정 지침'에 의거하여 계산하였다. 계산 결과는 PL치 7.90이며, '액상화 위험도가 높음'으로 나왔다. 액상화 현상에 동반하는 분출된 모래가 발생하여, 액상화 전후의 입도분포 변화와 상대밀도 변화가 발생하는 등 지반의 상태가 변화한 가능성이 높다는 점에서 실제 위험도와는 반드시 일치하지 않는 것으로 보인다. 액상화한 지반이 재차 액상화할 가능성이 있는 점이 지적되고 있는 것으로 보아 어떠한 대책을 세워 두는 것이 바람직하다. 액상화 전의 계산은 실시하지 않았으나 그림7의 SWS시험 데이터를 비교해 봤을 때 액상화 후가 다소 단단한 경향이 있는 것으로 보아 액상화 전의 위험도가 현재보다 높았던 것으로 생각된다. 또한 현재의 액상화 판정 계산이 반드시 안전하다는 쪽이 아니라는 것에 유의하여 지반에 맞게 기초를 선정(選定) 할 필요가 있다.

5. 결 론

이번 동일본대지진에 의한 우라야스시의 현지 조사를 실시한 결과 장소에 따라 액상화 피해 정도가 다르게 현저하게 매립지에 집중되어 있었다. 이것은 연약층 두께와 토질, 지하수위 등 지질 구조와의 관계가 깊다고 볼 수 있다. 또한 액상화 대책 지반 개량 공사를 실시했던 디즈니랜드 부지 내의 피해는 거의 확인되지 않았다.

액상화 등 지반 리스크에 대비하기 위해서는 지반의 굳기, 단단함 정도 뿐만 아니라 토질과 지하수위의 정보가 필요하다. 또한 액상화 대책은 앞으로의 지반 재해를 방지하기 위해서도 불가피할 것이다. 또한 본 연구실(후지이 연구실)에서는 액상화 판정에 빼놓을 수 없는 지하수위를 측정하기 위하여 스웨덴식 사운딩 시험공을 이용한 간편하고 정밀도 높은 지하수위 계측법의 연구 개발과 전기비저항법에 의한 토질 판별법 연구를 계속하고 있다.

이번 조사로 액상화의 판정에 이용되는 파라미터의 표준치가 절대 안전하지 않다는 것이 검증되었다. 또한 적절한 지반 개량 공사를 실시한 곳에서는 가옥의 액상화 피해가 없거나 적었다는 것을 알 수 있었다. 따라서 다음 단계에서는 단독주택을 대상으로 하여 지반 개량 공법에 따른 액상화 피해 정도의 차이를 검증해 보고자 한다.

참고문헌

1. 모리 신이치로 외 : 매립지 액상화에 의해 발생한 분사(噴砂)의 분출의 제특성, 토양과 기초No.32(2), pp.17-22
2. 방재과학기술연구소 : 강진 네트워크 Kyoshin Net (<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/quake/>)
3. 사카이 유키 : 발생한 지진동의 성질-2011년 도호쿠 지방 태평양 해역 지진 (<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/113g.htm>)
4. 우라야스시 홈페이지 : 매립지의 토지 이용 변천 / 우라야스시, 2011년 4월.