

단독주택을 대상으로 하는 지하수위 측정에 기초한 액상화 개략판정 Primary Judgment of Liquefaction Possibility Based on Groundwater Level for Detached Houses

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

¹⁾ 정회원, 기술부장, 호코쿠엔지니어링주식회사 기술본부, General Manager, Department of Engineering, Hokoku Engineering Corporation., kim@hokoku-eng.com

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

³⁾ 비회원, 호코쿠엔지니어링주식회사 기술부, Engineer, Department of Engineering, Hokoku Engineering Corporation.

SYNOPSIS : In Japan, the Swedish Weight Sounding (SWS) test is a popular and essential method for evaluating the ground bearing capacity in home site. Measurement of groundwater level using a SWS test hole is applicable only when a groundwater sensor or a rod with tapeline for eye measurement can be installed into the hole. However, the method of eye measurement technique using a SWS test hole, a foraminate pipe and an Alternating Current (AC) resistivity sensor. The excellent performance of the new technique may become an effective tool for the primary judgment of liquefaction possibilities of home sites.

요 지 : 일본의 경우, 단독주택을 대상으로 한 지반 조사는 스웨덴식 사운드(SWS)시험이 주류가 되고 있다. 그러나 스웨덴식 사운드 시험공을 이용한 지하수위 측정은 시험 후 구멍에 수위계를 투입해 측정 가능한 경우와 로드를 목시로 확인하는 방법으로 한정된다. 로드의 습기 상태를 목시로 판단하는 경우에는 정밀도에 문제가 생긴다. 그래서 SWS 시험공을 이용해 유공파이프와 교류식 비저항수위계(交流式比抵抗水位計)를 이용하는 새로운 지하수위 측정 기술이 지반 액상화 가능성에 대한 판정에 유효하다는 것을 확인했다.

Keywords : Measurement, Swedish Weight Sounding (SWS) test, Groundwater level, Elapsed time, Alternating Current (AC) Resistivity sensor, Detached houses

1. 서 론

최근 연구 결과를 통해 지표면에서 깊이 5m 정도의 포화된 모래층이 액상화되면 건물에 손상이 미칠 것으로 알려졌다. 또한 액상화층 위에 비액상화층이 두께 약 3m 이상 존재하면 소규모건축물의 피해는 일반적으로 경미한 것으로 생각되고 있다. 따라서 지하 수위가 3m 이상인지 이하인지를 확인하는 것은

액상화 판정을 할 경우에 중요하다. 이에 따라 택지 지반의 액상화판정을 위한 지하수위 측정방법에 주목하여 새로운 스웨덴식 사운드링 시험공을 이용한 측정방법과 토양 샘플링 장치를 개발하여 액상화의 개략판정을 시도해 보았다.

2. 실험 개요

실험에 사용한 유공파이프는 측면에 $\phi 4\text{mm}$ 구멍을 250mm 간격으로 뚫은 외경 $\phi 19\text{mm}$, 내경 $\phi 7\text{mm}$, 길이 1m의 중공의 강철로드이다. 중공로드의 끝에 스크류 포인트를 장착하여 SWS시험기로 관입 시험을 실시하는 방식으로 땅속에 관입한 상태로 수위를 측정했다. 측정된 수위가 정확한지 여부를 확인하기 위해 미리 수위 관측공을 설치해 두고 관측공의 수위와 일치한 수위를 지하 수위로 하여 이에 소요된 시간을 수속(収束) 시간으로 삼았다.

3. 실험 결과

그림1 현장측정 시험방법, 그림2에 각 토질별 측정 수위와 수속(収束) 시간의 결과를 표시한다. 그림2 (a)는 사질토, 그림2 (b)는 점성토의 결과이다. 토질 별로는 사질토 쪽 수속 시간이 빠른 추세에 있고 실트질의 비교적 투수성이 낮은 토질에 있어서 시간이 걸렸다. 또한 그림3에 불링 조사 A ~ G의 N치와 실험 결과의 지하 수위 관계를, 그림4에 A ~ G의 지하 수위와 수속 시간의 관계로 표시한다.

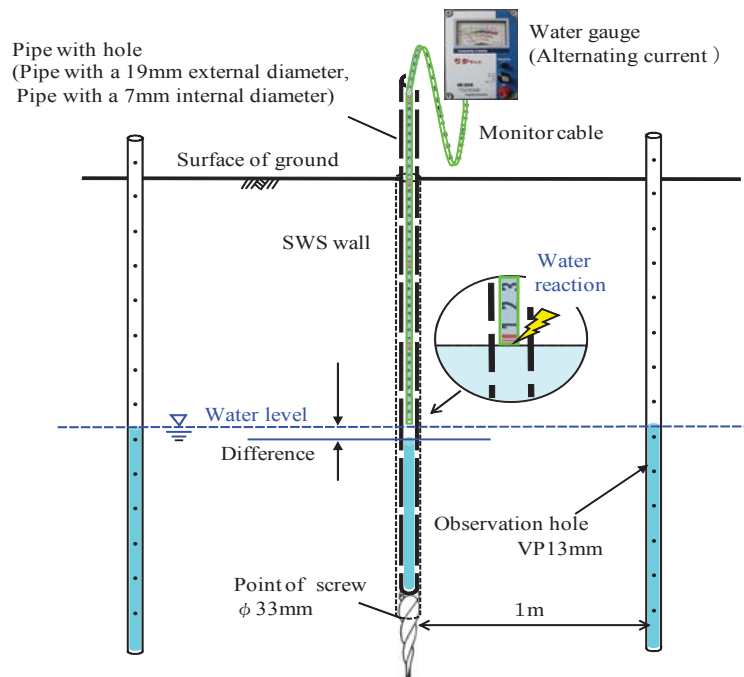
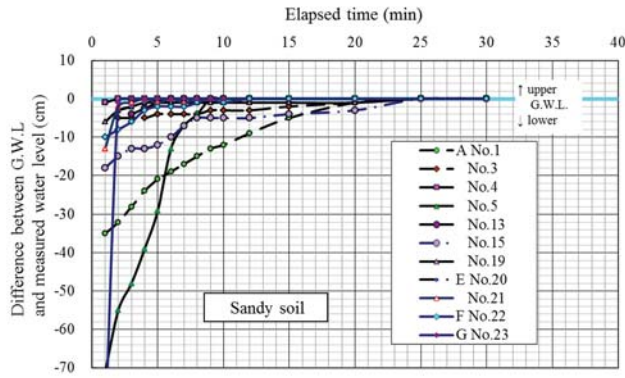
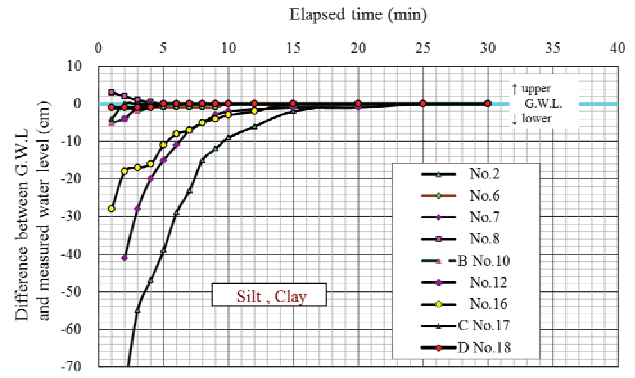


그림 1. 현장측정 시험방법



(a) 사질토의 결과



(b) 점성토 결과

그림 2. 측정 수위와 수축 시간

그림3의 A와 F는 같은 사질 지반이지만 F가 수축 시간 5분인 것에 비해 A는 25분 소요되었다. 이것은 토질 뿐만이 아니라 지반의 죄임과 경도가 관련된 것으로 판단되는 데서 N치에 주목하였다. 지하 수면 아래 N치를 보면 B~F는 N치 5이하의 느슨한 사질 지반이기 때문에 수축 시간이 빠른 것으로 사료된다. G는 N치 10정도이지만 투수계수가 높다고 하는 자갈이 섞인 사질이기 때문에 수축 시간은 3분으로 축소되었다고 생각된다. 이와 같은 수축시간의 비교를 통해 투수계수와 지반의 느슨함이 추측되지 않을까 싶다. 따라서 미지형구분에 의해 액상화의 가능성이 “대(大)” 라고 판단되는 A는 죄인 지반 때문에 “대(大)” 중에서는 액상화의 가능성이 낮고 F는 느슨한 사질 지반이기 때문에 “중(中)” 중에서도 액상화 가능성이 높다고 할 수 있다.

이 측정법에서 지반 상태의 차이에 따라 수축(収束)시간에도 차이가 있다는 것을 확인하기 위해 2차원 침투류 해석 (FEM)에 의해 수치해석을 실행하여 비교해 보았다.

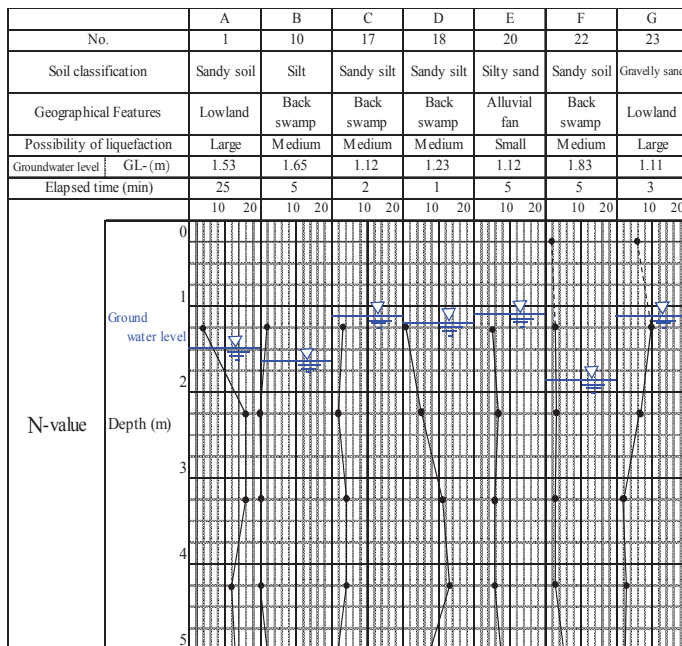


그림 3. 지하수위와 불링데이터의 N치

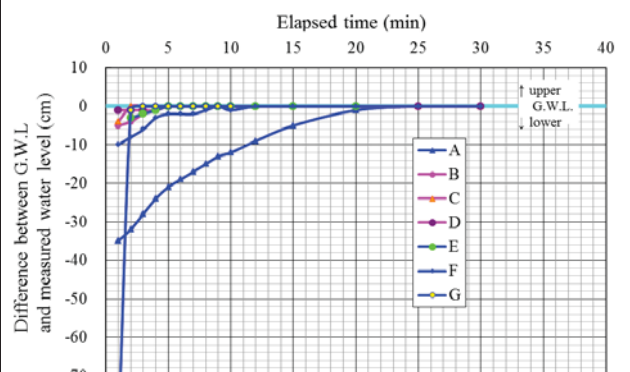


그림 4. 측정수위와 수축(収束)시간 (A ~ G의 결과)

4. 침투류 해석

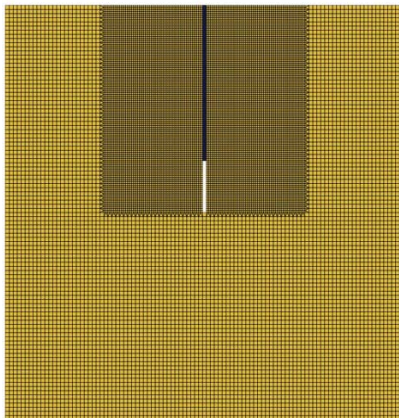
그림5에 사질토와 점토의 현장시험을 재현하기 위해서 작성한 2차원 침투류(FEM) 모델을 표시한다. 비정상 포화-불포화 침투류 해석법에 따라 해석을 실시했다. 수분 특성 곡선은 늘 경험적으로 이용되고 있는 “van Genuchten의 모델” 을 이용했다.

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} = \{1 + (\alpha \phi_c)^n\}^{-m} \quad m = 1 - \frac{1}{n}$$

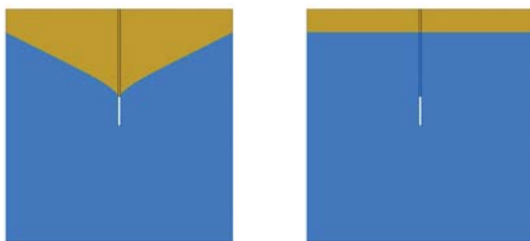
$$k_r = S_e^\epsilon \{1 - (1 - S_e^{1/m})^m\}^2$$

여기서, S_e :유효포화도, S_r :잔류포화도, α , n , m :토질에 의해서 정해지는 정수, k_r :비투수계수, ϵ :토질정수(=1/2), ϕ 19mm, $L=1m$ 의 유공파이프를 균일한 지반 안에 모델화했다.

표1에 표시한 지반(사질토와 점토)과 유공파이프의 투수계수는 Creager의 표와 시험 데이터를 바탕으로 결정했다. 해석에 있어서 시간이 경과되면 유공파이프 주변의 지하수위가 초기단계로 부터 최종단계까지 서서히 변화한다. 최종단계에 있어서는 그림6에 나타난 것처럼 유공파이프 주변 수위가 원래 위치까지 회복한다.



메쉬도



초기스텝 ⇒ 최종스텝

그림 5. 침투류 해석 모델도

표 1. 투수계수

	투수계수 (cm/sec)	유공 파이프의 투수계수 (cm/sec)	수속 시간 (sec)
사질토	$1.0 \times 10^{-2} \sim 1.0 \times 10^{-6} (1.0 \times 10^{-4})$	3.0×10^{-9}	60
점성토	$1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-8} (1.0 \times 10^{-7})$	3.0×10^{-912}	300

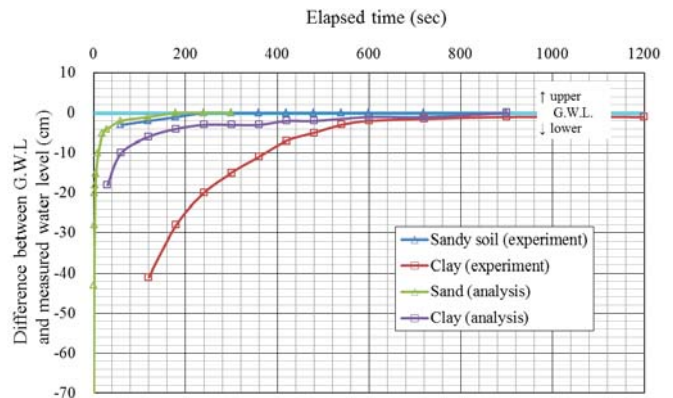


그림 6. 원위치 시험결과와 해석결과의 비교

시험 결과와 침투류 해석으로부터 얻은 경과 시간과 지하 수위의 관계 그래프를 그림6에 표시한다. 여기서 수축 시간의 경향을 조사하기 위해 그림3에 나타난 결과 중에서 점성토와 사질토 각각의 대표적인 계측 결과로서 No.18과 NO.20을 선택했다. 다른 시험 데이터와 비교해 이 두가지는 비교적 균질적인 지반(투수계수가 균일적)이라고 생각할 수 있기 때문이다. 그림6의 결과에 나타나 듯이 빠른 단계에 있어서 약간의 차이는 있으나 시험결과와 침투류 해석으로부터 얻은 수축 시간은 비교적 잘 일치하고 있다. 이로부터 SWS 시험공을 이용함으로써 유공파이프 주변 지반의 투수성을 대략적이거나 쉽게 평가할 수 있다. 토질분류(입도분포)와 흙의 투수성에는 상관관계가 있는 것에 비추어 볼 때 원위치 시험으로부터 얻은 지하수위의 수축 시간이 다음 장에서 보는 액상화의 가능성을 판단하는데 유용한 정보가 될 가능성이 많다.

5. 액상화의 개략판정

“소규모건축물 기초설계지침¹⁾”에 의하면 표층부 지반의 액상화 가능성의 정도는 대, 중, 소 등 3가지 카테고리로 분류된다. 그림7, 표2에 지형구분에서 본 액상화 가능성을 표시한다. 일본에는 이 외에도 액상화 간이판정법으로서 한계 N치법이 있다. 불링조사에 의해서 얻은 자료 중에서, 소정 심도 내의 사층의 N치가 정해진 한계 N치와 비교될 때 작고, 지하수위 이하인 경우에는 액상화될 가능성이 있다고 판정하는 방법이다. 그림8은 한계 N치와 심도의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림9은 소규모 건축물을 대상으로 하고 지표면으로부터 깊이 5m까지의 범위 내에서 표층 비액상화층의 두께 H₁과 그 하부 액상화층의 두께 H₂와의 관계에 따라 지표면에 피해가 미치는 정도를 나타낸 것이다. 여기서 비액상화층이란 지하 수위보다 얇은 사층 또는 점성토층(세립분 함유율>35%)이며 액상화층이란 비액상화층 하면에서 지표면하 5m까지의 사층을 말한다. ¹⁾

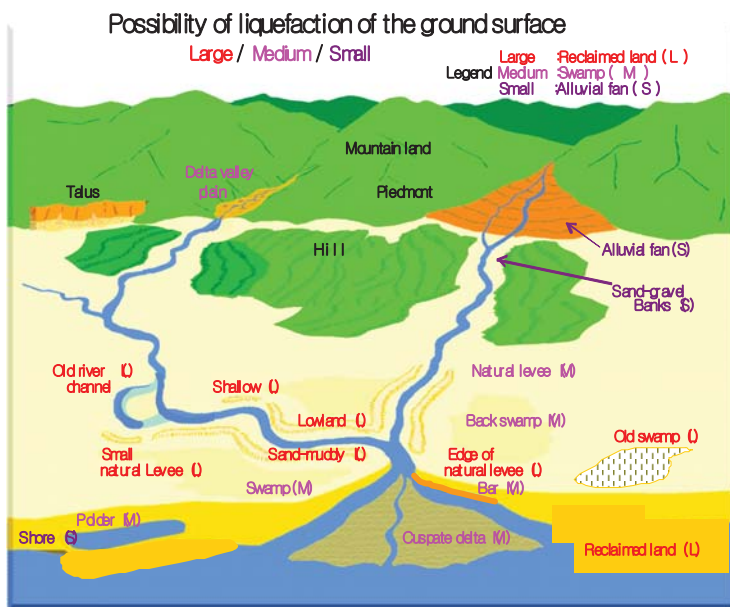


그림 7. 지형구분에서 본 액상화의 가능성

표 2. 지형구분에서 본 액상화의 가능성
“대(大)”, “중(中)”, “소(小)”

Possibility of liquefaction of the ground surface	Geographical features			
Large (L)	Edge of natural levee Old river channel Sand-muddy Reclaimed land	Small natural levee Low land Gentle in dune	Shallow Old swamp Artificial shore	Low land in dune Embankment Inflow water
Medium (M)	Alluvial fan of gentle slope Swamp	Delta valley plain Cuspate delta	Natural levee Bar	Back swamp Polder
Small (S)	Sand-gravel banks Delta plain of fan type	Alluvial fan Gravel bar	Shore Dune	

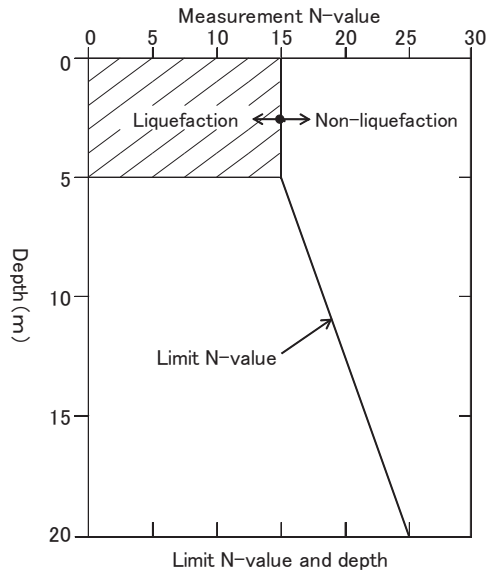
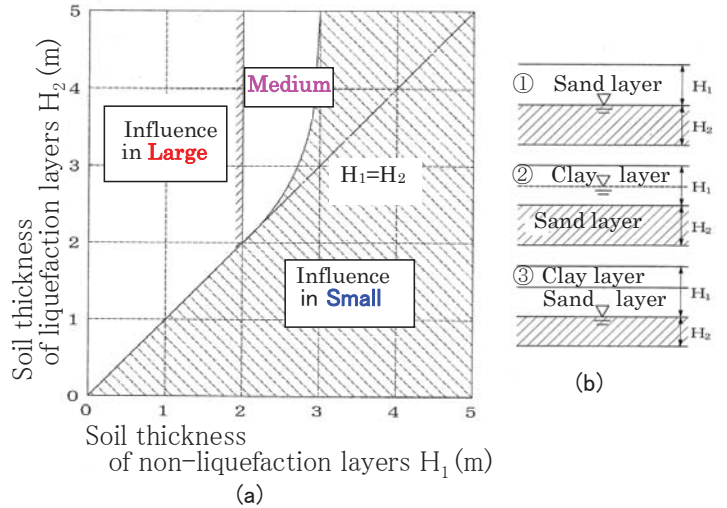


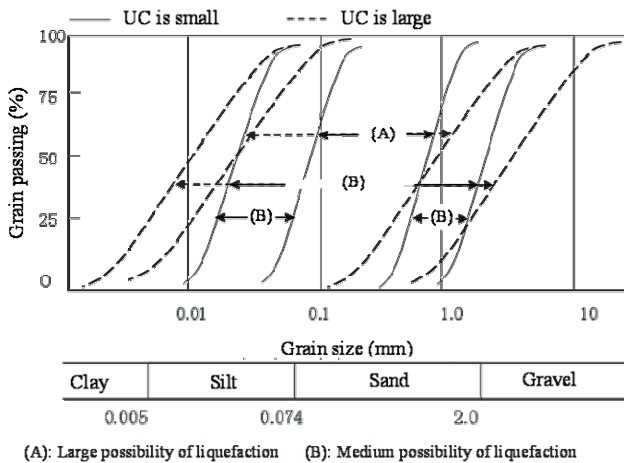
그림 8. 한계 N치에 의한 액상화 판정
(지반공학의 기초지식1) 그림152에 가필수정)



(지표면가속도 200cm/s²)

그림 9. 지표면에 대한 액상화의 영향범위
(일본건축학회, 2008)

액상화층이라고 해도 입도분포에 따라 액상화의 가능성은 다르다. 따라서 입도분포는 액상화 가능성 판단에 가미해서 생각하는 경우가 있다. 액상화하기 쉬운 입도분포의 예를 그림10에 나타냈다. 소규모 건축물을 대상으로 한 스웨덴식 사운딩시험의 경우 N치 15정도 이하의 비교적 느슨한 지반이 대상이며 N치 15이하의 지표면으로부터 5m까지의 액상화층이 모두 대상이 된다. 따라서 N치에 의한 액상화 판정은 고려하지 않고 스웨덴식 사운딩시험으로 관입 가능한 지반은 모두 대상으로 간주하였다.



(A): Large possibility of liquefaction (B): Medium possibility of liquefaction

그림 10. 액상화할 가능성이 있는 입도범위
(지반공학의 기초지식1) 그림23)

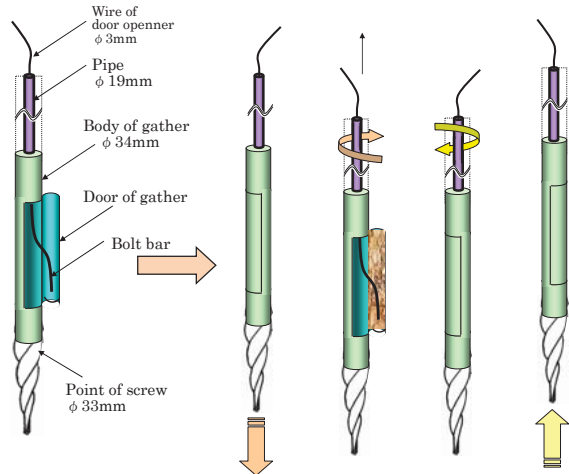


그림 11. 토질시료 채취방법

그림12에 기존자료와 SWS시험에 근거한 택지 액상화 판정 플로를 표시한다. 지형구분, 지질도, 지반도, 인근불링 데이터, 지자체가 발행한 지역 방재맵 등을 통해 그림12의 *항목에 해당하는지 여부를 판

단한다. 다음으로 지하수위, 사층의 두께와 심도 등에 기초하여 액상화 위험도의 개략 판정을 실시한다. 지하수위는 이번에 개발한 스웨덴식 사운드공을 이용한 지하수위의 측정법과 그림11의 샘플링 장치에 의해 토질의 샘플링을 실시해 토질의 판별, 사층 두께를 확인한다. 경우에 따라서는 채취한 시료에 대해 입도시험을 실시해 세립분 함유율에 따라 점성토인지 사질토인지를 확인한 다음에 액상화 판정을 실시한다. 소규모 건축물의 액상화 개략판정에서는 지중 응력의 관계로 건물에 장애가 발생하지 않는 범위를 GL-5m이심으로 정하고 있다. 따라서 지하수위가 GL-2m인 경우, GL-3m와 GL-5m로 흙의 샘플링을 실시하여 사층의 두께가 3m이상 존재할 가능성이 있으면 액상화 개략판정에서 액상화 검토가 필요없다고는 할 수 없다. 그러나 3m와 5m가 점성토라면 사질토층이 얇다고 판단될 수 있으므로 액상화 개략판정에서 액상화 검토를 할 필요가 없다. 따라서 본 측정법에서는 지하수위의 측정, 토질확인이 가능함으로 액상화 위험도를 대략적으로 판단할 수 있다.

<중지진동에 대한 지하수위에 기초한 단독주택의 액상화 개략판정>
(지표면 수평가속도치 150~200cm/s²)

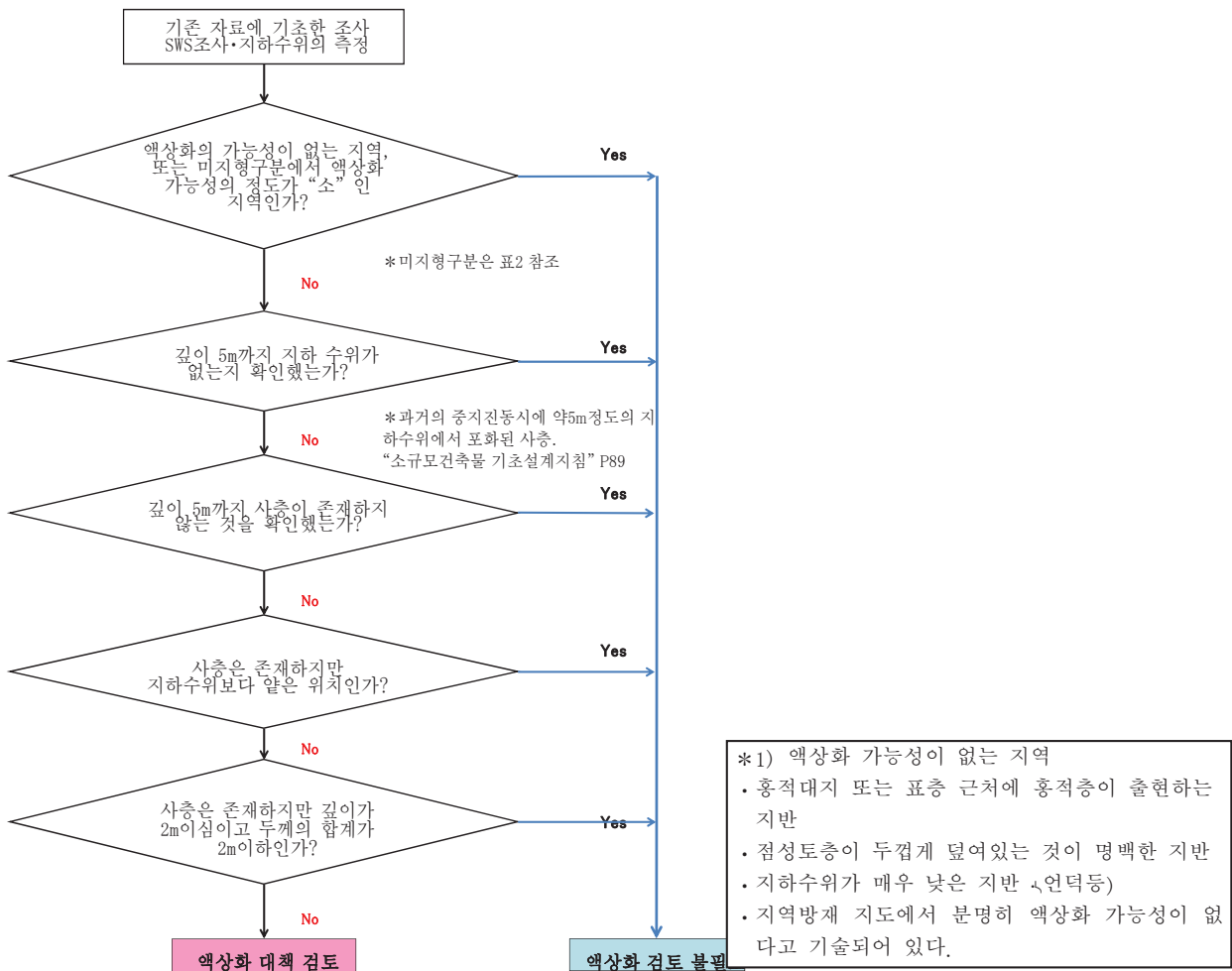


그림 12. 액상화 판정 플로차트(flow chart)

6. 결론

지표면에서 GL-3m정도까지 비액상화층이 존재할 경우 중지진동의 액상화 영향이 지표면에 이르지 않는 것으로¹⁾ 알려져 있다. 따라서 소규모건축물의 경우, GL-3m 정도까지의 비교적 얕은 위치의 지하수위가 확인된다면 유효한 판정수단이 될 수 있다. 이번 실험에서는 지하수위의 깊이와 토질의 차이에 따라 측정시간에 약간의 차이가 있었지만 SWS시험에 의한 사운드공을 사용하여 비교적 짧은 시간 내에 지하수위의 측정을 실시할 수 있어 액상화 판정에 유효함을 확인했다. 또한 건물에 장애를 미치는 영향범위의 GL-5m정도, 스웨덴식 사운드시험의 관입이 N치15정도 이하, 지하수위의 측정 및 흙의 샘플링이 가능한 경우에는 여기서 제안하는 “택지지반의 액상화 판정 플로”에 의한 액상화 개략판정이 가능하다. 향후 액상화 대책공법등의 확립도 필요하겠지만 택지지반이 액상화 피해를 받는 위험성이 적다. 즉 다시말하면 액상화 가능성이 “소”라고 할 수 있는 택지지반에 대한 판정을 해 가고자 한다.

참고문헌

1. Architectural Institute of Japan (2008).
“Recommendations for Designing of Small Buildings Foundations” , pp88-92 (in Japanese).
2. Kim, C H, Matsushita, K, Okano, T, Adachi, T, and Fujii, M (2009). “Method of measuring the groundwater level using the foraminate pipe un the hole of Swedish Weight Sounding Test”
Annual Meeting of AIJ, Structures 1, pp 635-636 (in Japanese).
3. Kim, C H, Tei, K, and Fujii, M (2010). “Measuring the Groundwater Level Using a Hole of the Swedish Weight Sounding Test” , *International Society of Offshore and Polar Engineering.*, (ISOPE), pp.789-792 (in English).
4. Kim, C H, Matsushita, K, Okano, T, Adachi, T, and Fujii, M (2010). “Method of measuring the groundwater level using the foraminate pipe un the hole of Swedish Weight Sounding Test (part2)”
Annual Meeting of AIJ, Structures 1, pp701-702 (in Japanese).
5. Saiki, K, Kajima Publishing company (1987). “Basic knowledge of geotechnical engineering” , pp62, 235 (in Japanese).
6. Takata, T, Majima, M, Isobe, Y, and Sato, M, Matsushita, K, (2009). “Research on design method liquefaction countermeasure for private housing (No.1)”
Annual Meeting of AIJ, Structures 1, pp 613-614, (in Japanese).