

파랑작용에 의한 모래지반의 액상화에 관한 대형 수리모형실험

강윤구* · 스즈끼고지로**

*삼성물산(건설부문) 토목사업본부

**일본 항만공항기술연구소 해양수공부

Large-Scale Experiments on the Wave-Induced Liquefaction of Sandbed

YOON-KOO KANG* AND KOJIRO SUZUKI**

*Civil Works Division, Engineering & Construction Group, Samsung Corporation, Sungnam, Gyonggi, Korea

**Marine Environment and Engineering Department, Port and Airport Research Institute, Yokosuka, Japan

KEY WORDS: Wave-induced liquefaction 파랑에 의한 지반 액상화, Large-scale experiments 대형 수리실험, Densification 고밀도화, Residual pore pressure 잔류간극수압, Oscillatory pore pressure 변동간극수압, Shear strain 전단 변형률

ABSTRACT: A series of large-scale experiments were carried out in order to examine wave-induced liquefaction in a loosely packed sandbed, its afterward high densification and liquefaction by oscillatory pore pressure. The experiments were conducted in a Large Hydro-Geo Flume that can nearly solve the problems of scale effects of the sandbed, and the 50% sieve diameter of sand was 0.2 mm. The generation of residual pore pressure and its afterward high densification which had observed by Takahashi et al. (1999) in a wave flume experiment using fine sand with the size of 0.08 mm. As a result, the relative density of the sandbed after high densification was increased up to 79% and liquefaction by oscillatory pore pressure was not observed.

1. 서 론

최근들어 매년 만성적으로 되풀이되고 있는 적조발생 등 환경 악화와 이에 따른 수산 어획량 감소 등 많은 환경문제가 야기되고 있다. 이에 대한 원인 중의 하나가 연안역 개발에 따른 갯벌 및 천해역 매립에 있다는 인식과 함께 갯벌 보전과 창출(인공갯벌의 조성)에 대한 사회적인 요구가 강하게 고조되고 있다. 특히 갯벌과 천해역을 인공적으로 조성하는 방안이 대안으로 떠오르고 있지만, 인공적으로 조성시 나타날 수 있는 문제점에 대해서는 아직 구체적인 논의가 이루어지지 않고 있다.

갯벌 및 천해역을 인공적으로 조성할 경우 이들 지반은 일반적으로 느슨한 상태로 조성되며, 조성후 파랑작용을 받을 경우 지진시에 발생하는 현상과 비슷한 잔류간극수압의 발생을 동반한 대규모의 액상화가 발생할 가능성이 높다. 또한 이러한 지반 부근에 구조물을 설치한 경우에는 구조물이 파랑에 의한 액상화로 인해 대규모의 파괴로 이어질 수 있다.

한편, Zen(Zen and Yamazaki, 1990a; 1990b; Zen, 1993)은 이미 단단한 상태로 형성된 모래지반에 대해 연직방향의 진동압(Oscillatory pressure) 발생 장치를 이용한 모형실험을 통해 지반 내의 변동간극수압에 의한 액상화에 의해서 구조물의 침하가 발생할 수 있다고 강조했으며, 이후 해안의 많은 구조물의 침하에 대해 액상화와 결부한 원인분석이 활발하게 추진되기도 했다.

그렇지만 Takahashi et al.(1999)은 모래의 중앙입경이

0.08mm인 세립사(Fine sand)를 이용한 소형 조파수로에서의 모형실험을 통해 느슨한 상태로 퇴적된 지반은 액상화가 발생후 고밀도화(Densification, 일명 Sand compaction 현상)의 과정을 거치며, 그 후는 기존(Zen, 1993; Zen and Yamazaki, 1990b 등)에 알려진 것만큼 액상화가 쉽게 발생하지 않는다는 결과를 얻었다.

점토 및 실트 성분이 많은 준설토를 이용하여 소형 조파수로에서 수행한 의한 실험(강윤구, 2006)에서는 먼저 액상화 현상이 발생하고(점토성 지반의 경우는 유동화(Fluidization) 현상으로 보는 것이 보다 일반적임), 파랑작용이 보다 장시간 지속될 경우 일부에서는 고밀도화 과정이 진행되어 지반이 매우 단단해지는 결과가 얻어졌다.

이와같이 실험방법에 따라 다른 결과가 나타나고 있고 또한 소형 실험에서 부딪히는 스케일 효과로 인한 것일 수도 있기 때문에 모래지반의 스케일 문제를 극복할 수 있는 보다 대규모의 실험에 의해 그 성질을 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 이와같이 느슨한 상태로 퇴적된 모래지반의 파랑작용에 의한 액상화 발생과 그후의 고밀도화 현상, 그리고 변동간극수압에 의한 액상화 현상을 파악하기 위하여 모래지반에 대한 축척효과의 문제를 충분히 해결할 수 있는 대형 조파수로에 모래지반을 조성하고 파랑을 발생시킨 모형실험을 수행하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험 수로 및 방법

교신저자 강윤구: 경남 진해시 안골동 75

055-552-9871 yoonkoo.kang@samsung.com

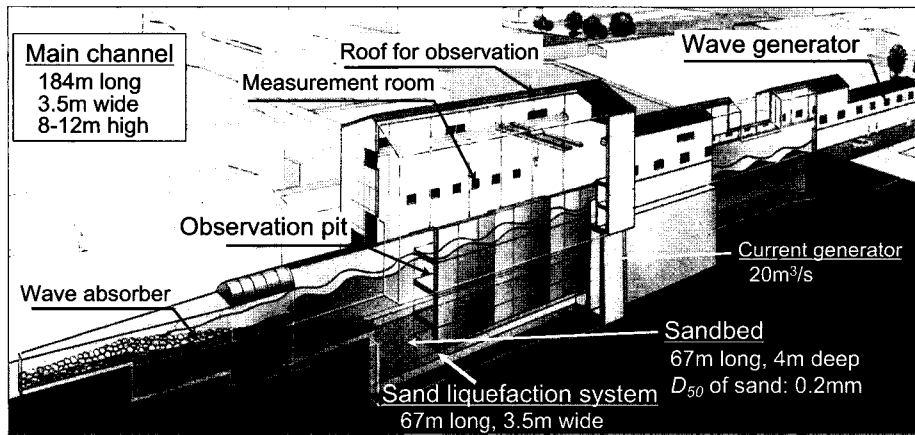


Fig. 1 Large Hydro-Geo Flume at Port and Airport Research Institute, Japan

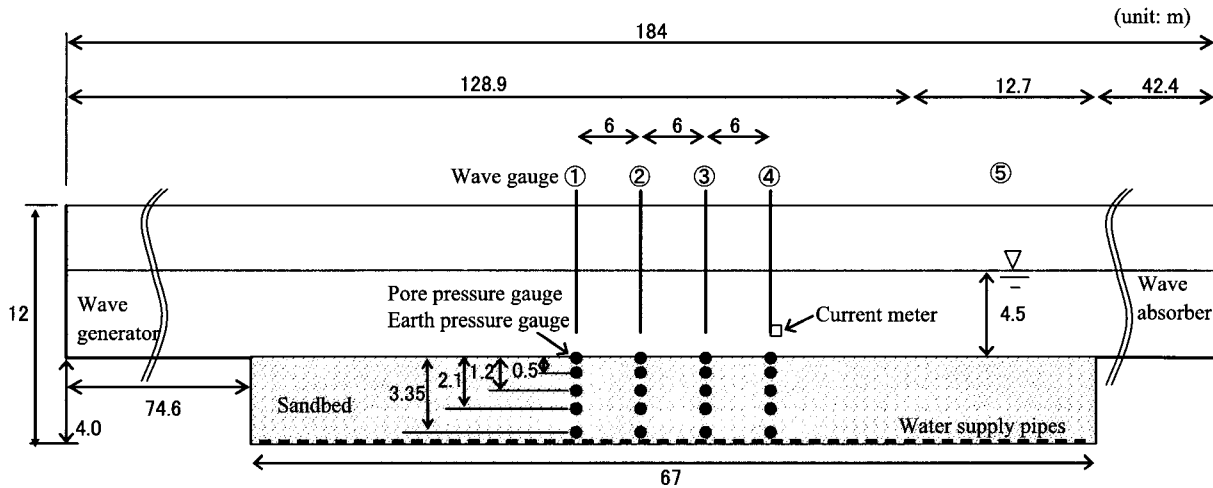


Fig. 2 Experimental setup

수리모형실험은 일본 항만공학기술연구소의 대규모 파동지반 종합수로(Shimosako et al., 2001)에서 실시하였다. Fig. 1은 수로의 모습 및 제원을 보여주고 있다. 수로는 길이 184m, 폭 3.5m, 깊이 8~12m로서 발생 파고는 3.5m까지 가능하다. 수로의 중앙부에 길이 67m, 두께 4m로 모래지반이 구성되어 있으며, 투입 모래는 Australia의 Flattery sand이다. 그리고 모래지반의 하부에는 수조의 바닥면에서 0.4m 위치에 액상화 소파시스템(Kang and Takahashi, 2006)이 설치되어 있다. 이 시스템은 파이프를 통하여 상향의 침투류를 발생시킴으로써 지반을 액상화시킬 수 있으며, 지반과 관련한 실험시 지반을 일괄적으로 액상화시켜 지반의 초기 특성을 조절하는데도 이용되고 있다.

Fig. 2은 파고계, 유속계, 간극수압계의 설치 위치를 나타낸다. 특히 간극수압계는 수로의 측면에 설치했으며, 설치시 수중에서 압력 센서부와 Poros stone 사이의 공기를 없애기 위해 수중에서 공기를 빼고 설치하였다. 액상화시의 지반의 움직임과 변형율을 계측하기 위해 Fig. 1의 관측창 쪽에 비디오카메라를 설치하여 지반의 움직임을 촬영하였다. 비디오카메라에 의한 영상과 간극수압계 등의 아날로그 데이터를 PC에서 동시에 받을 수 있도록 하였다. 비디오 영상은 IEEE1394 경유하여 15fps로 샘플링

Table 1 Experimental cases (progressive regular waves)

Wave period T (s)	Wave height H (m)
3.0	0.5, 1.0, 1.5
5.0	0.5, 1.0 , 1.5 , 2.0 , 2.5
7.0	0.5, 1.0 , 1.5 , 2.0 , 2.5

하였다. 또한 간이 동적 콘관입 시험에 의해 액상화 전후의 지반강도를 계측하였다.

실험 파는 Table 1에 나타낸 바와 같이 수심 h 를 4.5m로 일정하게 하고, 주기 $T=3\sim7s$, 파고 $H=0.5\sim2.5m$ 의 규칙파를 200파정도 연속해서 작용시켰다. 표중에 굵은 숫자는 파랑작용에 의해 지반에 액상화가 발생한 경우이다.

2.2 실험 모래 및 초기지반 조건

Fig. 3은 실험에서 사용한 Flattery sand의 입도분포를 보여준다. 모래는 중앙입경이 0.2mm로서 비교적 세립질(Fine sand)이 균질한 편이다. 투수계수가 0.05cm/s이며, 모래의 밀도는 최

대 · 최소가 각각 1,654와 1,403kg/m³이다.

지반의 초기조건은 준설토로 매립한 상황처럼 연약한 상태를 상정한 지반 조성을 위하여 Fig. 1과 Fig. 2에서 보여준 바와 같이 지반 하부에 설치한 액상화 소파 시스템(Kang and Takahashi, 2006)을 이용하였다. 지반 하부의 파이프를 통하여 4.3×10³(m³/s/m²)상향 침투류를 발생시켜 대상 지반 전체를 액상화시킨 후 상향침투류를 정지시켜 그대로 두게 되면 모래지반이 침하한다. 이때의 지반고는 지반 하부의 파이프로부터 4m정도(전체두께 4.4m)이다. 이 상태에서 주기 5s, 파고 2m 이상의 파랑을 작용시키면 지반은 단단해지고, 지반은 0.3m정도 침하하였다. 이 상태에서 지반표층으로부터 0.6m 하부 지점의 밀도와 상대밀도는 각각 1,600kg/m³과 79%였으며, 지반 층의 두께 변화로부터 액상화 후의 초기 지반의 밀도와 상대밀도는 각각 1,600kg/m³과 31%정도로 추정된다. 이들 결과로부터 조건에 따른 모래의 밀도 및 상대밀도를 정리하면 Table 2와 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파랑에 의한 액상화 발생과 지반거동

Fig. 4는 느슨한 상태로 퇴적된 지반에 주기 T=5s, 파고 H=2.0m의 파랑을 작용시킨 경우의 수면변위 η_w 와 지반 내의 간극수압 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 그리고 비디오 영상으로부터 얻은 지반 표층의 변위 η_s , 지반의 모래입자 운동속도(유속) u , 전단변형률(Shear strain) γ 를 나타낸 것이다. 지반은 파랑작용과 거의 동시(조파 후 t=32s)에 지반표층이 움직이기 시작하고, 지반운동의 전진폭이 0.3m정도로 상하운동을 하고 있다. 지반 표층의 움직임은 파랑작용 초기단계(t=32~45s)에서는 수면변위와 비슷한 위상을 가지고 움직이고 있으나, 시간이 경과함에 따라 수면변위의 위상보다 조금씩 늦어지면서 t=100s부근에서는 수면변위의 위상과 거의 역으로 나타나고 있음을 볼 수 있다.

파랑작용에 의한 모래입자의 운동속도(유속)는 서서히 커지고 있고, 수평방향 및 연직방향의 유속은 각각 0.2, 0.1m/s정도이다. 그림에서 유속이 0의 상태가 되는 시간이 나타나고 있는데, 이는 지반의 수평방향의 변위가 최대가 될 때 지반의 움직임이 일시적으로 멈추기 때문이며, 모래입자의 궤적에서도 이러한 현상을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 파랑 1주기간의 영상으로부터 각 화소에 대해서 최소의 휘도치를 추출한 그림이다. 모래지반 내부에 검은 입자가 있는 경우 검은 점은 휘도치가 낮기 때문에 이 입자의 1주기간의 모래입자의 운동궤적을 알 수 있게 된다. 파랑의 수립자 운동과 마찬가지로 모래입자도 타원운동을 하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 4의 모래입자 운동속도(유속)으로부터도 유추한 바와같이 수평방향의 모래입자 움직임이 최대가 되는 시점에서 모래움직임의 일시적인 멈춤이 나타났다.

전단 변형률(Shear strain) γ 는 4점의 Tracer-용의 입자를 선정, 이들 입자에 대하여 Ohneda et al.(1984)에 의한 화상해석수법을 이용하여 구했다. 파랑이 작용함에 따라 모래가 조파기 쪽으로 이동해 가는 현상이 나타나 전단변형률 γ 가 서서히 커지는 식으로 나타났다. 지진발생시는 전단변형률이 대체로 5%정도가 되는

시점에서 지반에 액상화가 발생하는 것으로 보고되고 있다(Ishihara, 1976). 이 정의로부터 보면 Fig. 4에서는 t=30s에서 액상화 상태가 되는 것으로 볼 수 있다. 그리고 위치에 따라서는 모래가 Offshore 쪽으로 이동하는 곳도 있었는데 이에 대한 정확

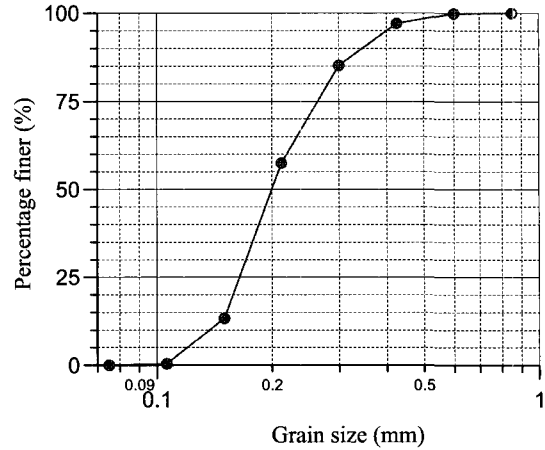


Fig. 3 Grain size accumulation curve of Flattery sand

Table 2 Density of Flattery sand

	Density (kg/m ³)	Relative density (%)
Minimum	1,403	0
Initial cond.	1,480	31
After wave action	1,600	79
Maximum	1,654	100

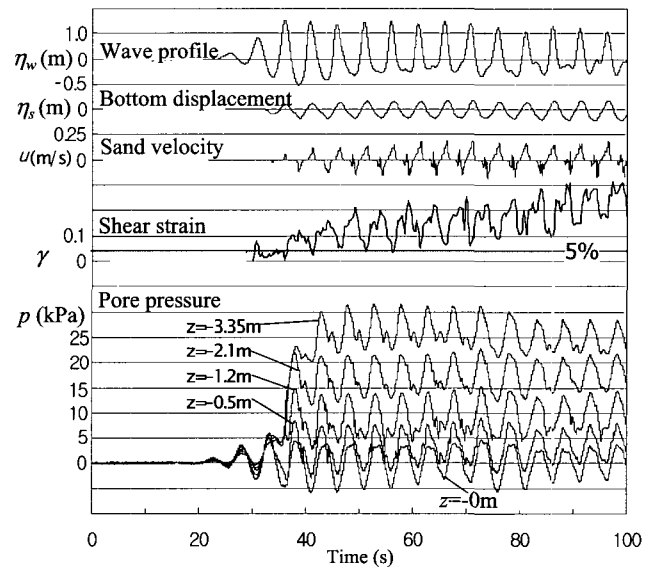


Fig. 4 Bottom displacement, sand particle velocity, shear strain and pore pressure under wave action (T = 5 s, H = 2.0 m)

한 원인은 알 수 없다.

한편 간극수압은 $t=32s$ 이후부터 서서히 상승해서 액상화 발생과 관련한 잔류간극수압이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 지반하층의 경우가 표층보다 잔류간극수압이 최대로 상승하는데 걸리는 시간이 길고, 표층부가 보다 빨리 액상화하는 것을 알 수 있다. 또한 간극수압의 변동성분(변동간극수압)은 액상화 후 지반상층으로부터 하층까지 거의 비슷한 위상에서 발생하고 있다.

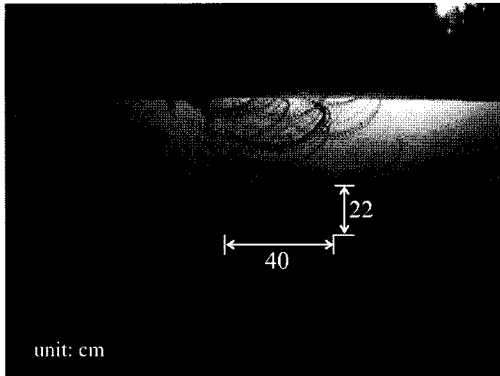


Fig. 5 Traces of elliptic motion of sand particles by wave action

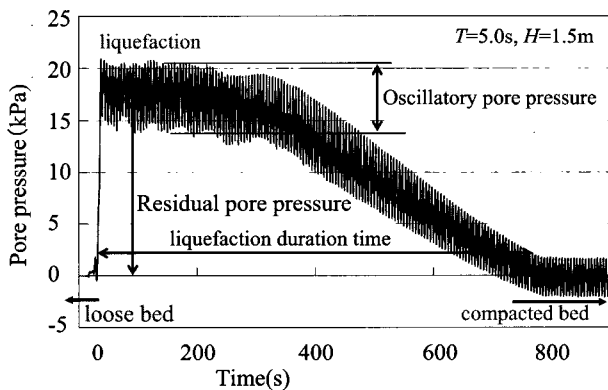


Fig. 6 Wave-induced densification and variation of pore water pressure at $z = -2.1$ m

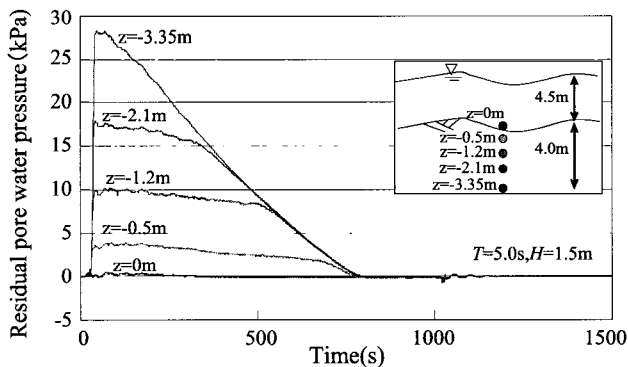


Fig. 7 Dissipation of residual pore water pressure by wave action ($T = 5.0$ s, $H = 1.5$ m)

3.2 액상화 후의 지반의 고밀도화

3.2.1 고밀도화와 간극수압

잔류간극수압(Residual pore pressure)에 의한 지반내부의 간극수압이 지반표층으로 서서히 빠져나가면 액상화에 의한 잔류간극수압도 서서히 소산된다. Fig. 6은 지반 표층으로부터 2.1m 깊이에서의 간극수압의 시계열 파형이며, Fig. 7은 1주기 동안의 간극수압을 이동 평균하여 잔류간극수압 성분만을 나타낸 것이다. 잔류간극수압은 각 층별로 일정한 값을 유지하다가 소산되고 있으며, 지반 하층일수록 빨리 시작하여 조파개시 후 750s 경에 전층에서 0으로 떨어졌다. 이러한 잔류간극수압의 소산은 지진에 의한 액상화 발생시나 Takahashi et al.(1999)가 행한 세립사를 이용한 소형조파실험에서도 나타난 현상이며, 간극수가 지반 표층으로부터 빠져나갈 때 분사현상이 발생하는 경우도 있다. 단, 이번 실험에서는 모래의 투수계수가 소형조파실험시보다 크기 때문에 분사현상은 나타나지 않았다.

Fig. 8은 간극수압으로부터 잔류간극수압을 뺀 변동간극수압(Oscillatory pore pressure)을 보여준다. 액상화 발생시에는 간극수압이 지반표층으로부터 하층까지 거의 동위상, 동진폭으로 발생하고 있지만, 계속되는 파랑작용에 따라 지반이 고밀도화가 진행하면서 지반하층으로 갈수록 위상지연이 발생하고 또한 간극수

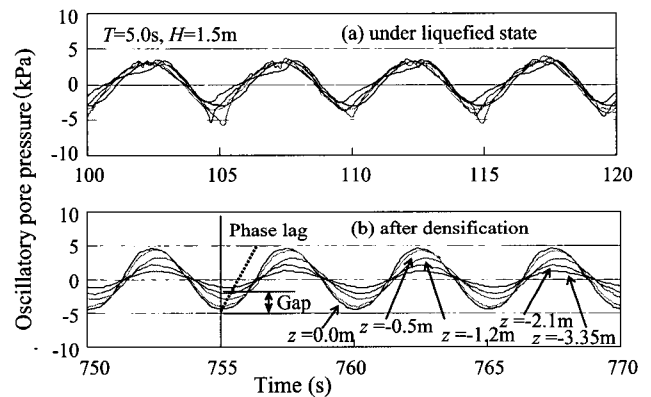


Fig. 8 Variation of oscillatory pore pressure induced high densification of sandbed by wave action

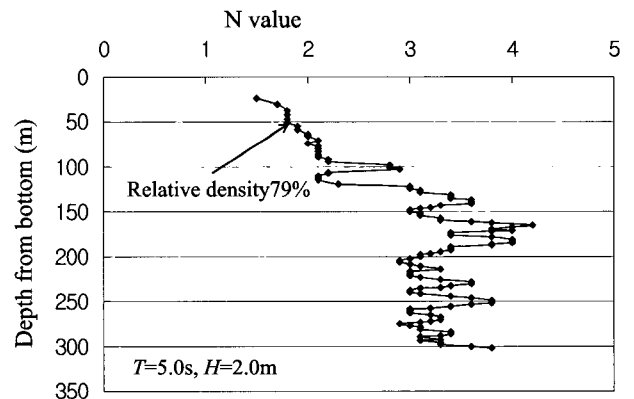


Fig. 9 Strength of sandbed strength after densification by wave action

압의 변동 진폭이 감소하고 있음을 알 수 있다.

이와같은 지반의 고밀도화 과정은 지반을 강제적으로 액상화시키는 '액상화 소파 시스템'(Kang and Takahashi, 2006)을 이용하는 경우에도 균질한 액상화가 형성되지 않을 때는 지반의 고밀도화가 진행되어 액상화 지반에 의한 소파효과가 급격히 떨어지는 현상이 나타났다.

3.2.2 고밀도화와 간극수압

Table 2로부터 보여준 바와 같이 파랑작용에 의해 지반이 단단해지면 지반의 밀도와 상대밀도가 각각 $1,480\text{kg/m}^3$, 0.31에서 $1,600\text{kg/m}^3$, 0.79로 증가하였다. Fig. 9는 지반이 고밀도화 한 후의 간이 동적콘관입시험으로 얻어진 지반강도(N치)이다. 초기지반에서는 N치가 0으로 콘이 자중만으로도 지반 밑바닥까지 침하하였으나, 지반이 고밀도화 하여 N치가 커져 지반 깊이 3m에서 3~4 정도였다.

3.2.3 파고 및 주기와 고밀도화의 관계

Fig. 10은 Fig. 6에서 정의한 액상화의 지속시간을 파고 및 주

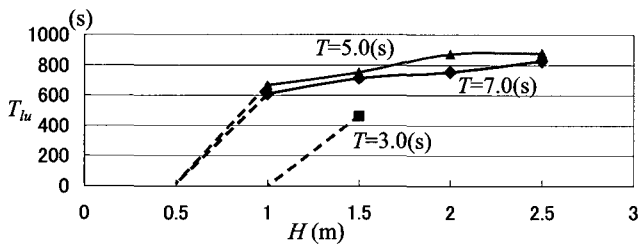


Fig. 10 Liquefaction duration time T_{lu}

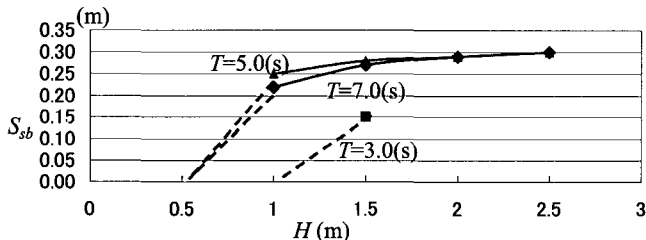


Fig. 11 Settlement S_{sb} of sandbed by wave actions

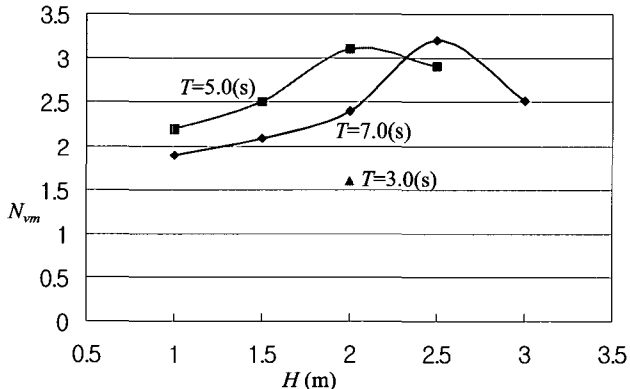


Fig. 12 Strength N_{vm} of sandbed after densification (N_{vm} : vertical mean N value)

기의 변화에 따라 나타낸 것이다. 액상화의 발생한계는 주기 3s의 경우 파고 1.5m, 주기 5s, 7s의 경우 1m이다. 액상화의 지속시간은 파고가 클수록 길지만, 쇄파한계를 초과하면 그 이상 길어지지 않는다. 그리고 주기 5s의 경우가 주기 7s의 경우보다 지속시간이 길게 나타났다.

Fig. 11은 파랑에 의한 지반 침하량을 파고 및 주기의 변화에

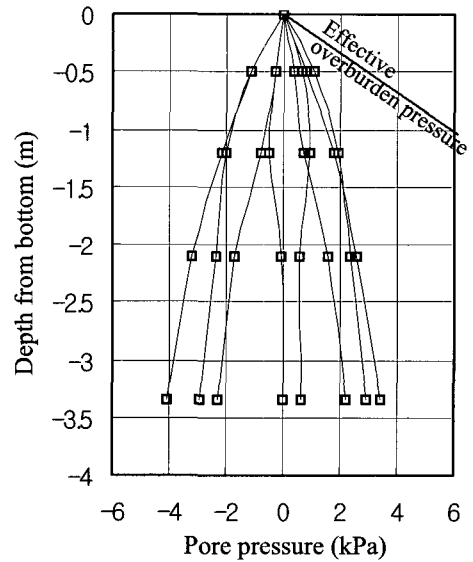


Fig. 13 Oscillatory pore pressure after densification ($T = 5$ s, $H = 2$ m, time = 100 s)

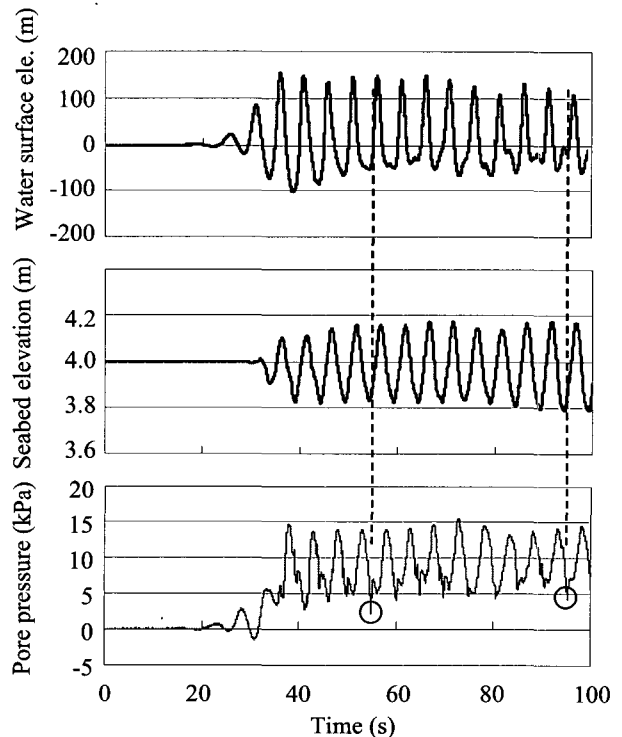


Fig. 14 Negative pressure induced expansion of sandbed by wave action ($T = 5.0$ s, $H = 2.0$ m)

따라 나타낸 것이다. 지반침하량의 변화는 잔류간극수압의 지속 시간의 경향과 거의 비슷한 양상을 보여주고 있다 이는 액상화가 발생한 깊이와 액상화의 지속시간이 서로 밀접한 관계가 있음을 보여주는 것이다.

Fig. 12는 고밀도화 후의 지반강도(N치)를 파고 및 주기의 변화에 따라 나타낸 것이다. N치는 깊이 방향의 평균치로 구한 것이다. 이 경우에도 Fig. 10과 Fig. 11과 거의 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.2.4 고밀도화 후의 변동간극수압에 의한 액상화

Fig. 13은 고밀도화 후의 변동간극수압의 연직분포이다. 변동간극수압이 유효토압보다 커지면 액상화가 발생하는 것으로 알려져 있다(Zen, 1993). 그렇지만 금번 실험에서 수행한 모든 파랑조건에 의해서도 Fig. 13과 마찬가지로 유효토압을 초과하는 경우가 없었다. 상대밀도가 80%까지 고밀도화 한 상태에서 변동간극수압에 의한 액상화는 발생하기 어려운 조건이었을 가능성도 있다.

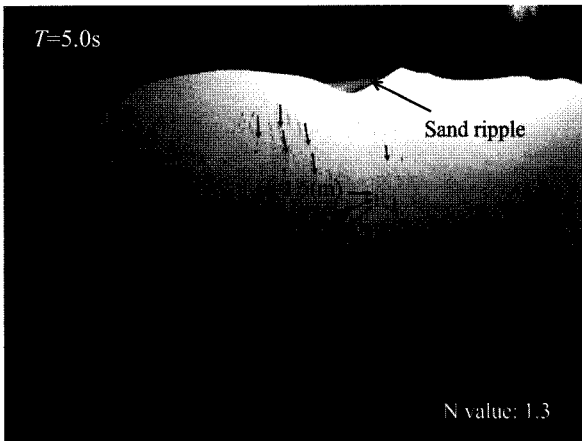


Fig. 15 Densification progress of sandbed without liquefaction

3.2.5 지반 팽창에 의한 변동수압의 부압

Fig. 14는 T=5s, H=2.0m의 파랑이 작용한 경우에 있어서 수면 변위, 지반변위 및 간극수압의 변화를 보여준 것이다. 이 경우에 있어서 잔류간극수압에 의해 액상화가 발생할 경우 변동간극수압에 뽀족한 (-) 피크치의 수압(부압)이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 부압은 Foda(1991), Takahashi et al.(1999)에서도 언급하고 있다. 부압의 피크는 지반표층의 변위가 상승할 때 발생한다. 한편, 전단변형율이 비슷한 상황으로 큰 지반표층의 하강시에는 이러한 부압은 발생하지 않는다. 따라서 이와같은 부압은 지반이 상승하려고 할 때 지반골격이 팽창되려고 하면서 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

3.2.6 액상화가 발생하지 않는 경우의 고밀도화

3.2.1~3.2.5에서는 액상화에 의해서 잔류간극수압이 발생하고, 그 후는 잔류간극수압의 소산에 의해 지반이 고밀도화 되는 상황에 대해서 서술하였다. 그리고 주기 3s, 파고 0.5m로서 파고가 작은 조건에서는 액상화가 발생하지 않는 것으로 언급했지만, 좀더 세밀하게 관찰해보면 지반표층 수 mm의 부분은 단단해져 있으며, 파랑을 작용시켜면 곧 표층부에 사런(Sand ripple)이 발생하였다.

이와같이 표층만 단단해진 상태의 지반에 Fig. 10에서 액상화가 발생한 것처럼 큰 파랑을 작용시켜도 액상화는 발생하지 않았다. Fig. 15는 이 경우에 나타난 지반 내의 모래입자의 운동궤적을 나타낸 것이다. 액상화는 발생하지 않았지만 지반이 서서히 고밀도화 되고 있고, 모래입자가 침하해가는 것을 볼 수 있다. 이 경우 초기지반에서는 N치가 0이었지만 파랑작용에 의해 서서히 고밀도화 되면서 N치가 1.3정도였다.

이와같이 액상화를 동반하지 않는 고밀도화 현상은 이번 실험에서 처음 나타난 현상으로 지금까지 수행된 소형실험을 포함하여 정리하면, 고밀도화 현상에는 Fig. 16에 나타낸 바와같이 3가지 패턴으로 나누어 볼 수 있다.

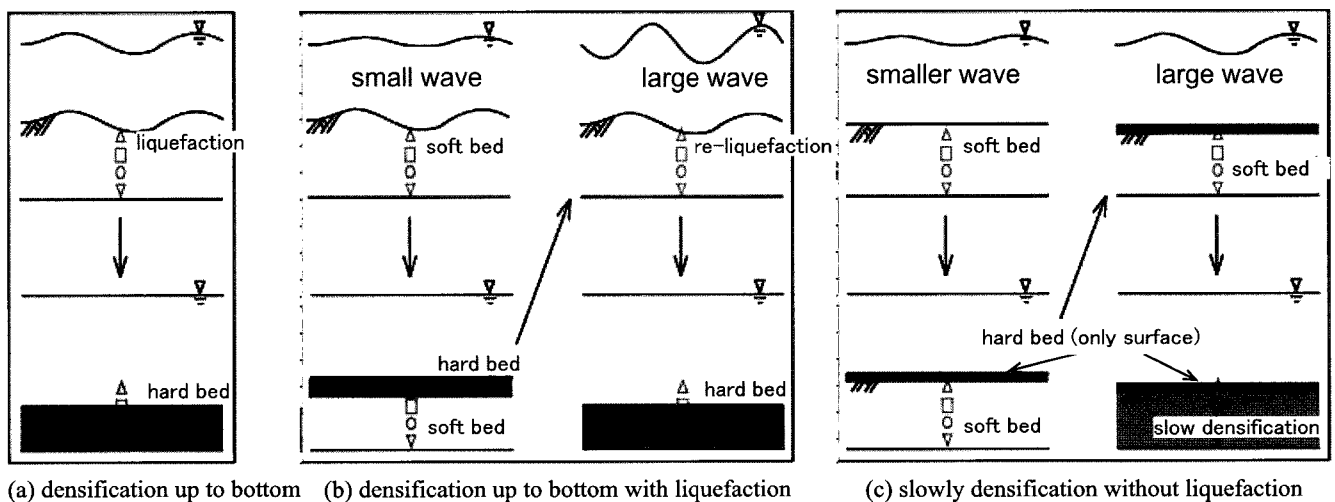


Fig. 16 Densification patterns of sandbed by wave actions

(1) 액상화가 발생하면서 지반표층에서 하층까지 고밀도화 하는 경우

(2) 비교적 작은 파고의 파랑에 의해서는 지반표층부에서만 고밀도화가 진행되지만, 이후 보다 큰 파고의 파랑이 작용하면 다시 액상화가 발생하고 지반하층까지 고밀도화가 진행되는 경우

(3) 비교적 작은 파고의 파랑에 의해 지반표층부에서만 고밀도화가 진행된 후 비교적 큰 파고의 파랑을 작용시켜도 액상화가 발생하지 않지만 계속되는 파랑의 작용에 의해 서서히 고밀도화가 진행되는 경우

4. 결 론

느슨하게 퇴적된 모래지반에 파랑이 작용할 경우 발생하는 액상화 및 그 후의 고밀도화 과정을 확인하기 위하여 수심 4.5m, 파고 0.5~2.5m, 주기 3, 5, 7s 정도의 Prototype 규모의 조건 하에서 중앙입경 0.2mm, 투수계수 0.05cm/s의 모래를 이용한 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 또한 초기지반은 상향침투류를 발생시키는 장치를 이용하여 지반 전체를 액상화 상태로 만든 후 일정 크기의 파랑을 작용시켜 비교적 느슨한 지반상태에서 실시하였다.

(1) 느슨한 상태로 퇴적된 모래지반에 파랑을 작용시키면 지반은 잔류간극수압이 발생하면서 액상화되고, 모래입자는 수립자와 마찬가지로 타원체도의 운동을 한다.

(2) 잔류간극수압은 간극수가 지반표층으로부터 서서히 누출되면서 소산되고 지반은 고밀도화 된다. 지반의 액상화와 그후의 고밀도화에 따른 간극수압의 변화는 Takahashi et al.(1999)의 소형실험결과와 비슷한 결과가 얻어졌다.

(3) 지반의 상대밀도는 초기지반에서 31%에서 고밀도화 후에는 79%까지 증가하였다.

(4) 액상화 시의 모래지반의 타원운동 유속은 0.1~0.2m/s 정도였고, 전단변형율은 5%를 초과하였다.

(5) 파고가 클수록 액상화의 지속시간, 액상화 후의 지반침하, 지반강도의 증가량이 크게 나타났다. 그리고 주기 3s~7s의 조건에서는 5s에서 액상화의 정도가 가장 크게 나타났다.

(6) 이외에도 액상화가 발생하지 않는 경우에도 계속되는 파랑 작용에 의해 지반이 서서히 고밀도화 되는 현상이 나타났다.

후 기

본 연구에 협력해주신 일본 항만공학기술연구소 시모사코 내파 연구실장님을 비롯하여 타다씨, 야마자키씨 등께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강윤구 (2006). "파랑작용에 의한 준설토 지반의 안정성에 관한 실험적 연구", 한국해양공학회논문집, Vol 20, No 4, pp 43-49.
- Foda, M.A., Tzang, S.Y. and Maeno, Y. (1997). "Resonant Soil Liquefaction by Water Waves", Geo-Coast'91, Vol 1, pp 549-554.
- Ishihara, K. (1976). Fundamentals of Soil Dynamics, Kashima Press, Tokyo, Japan.
- Kang, Y.K. and Takahashi, S. (2006). "Development of a Wave Absorbing System Using a Liquefied Sandbed", J. of Ocean Engineering and Technology, Vol 20, No 4, pp 9-16.
- Ohneda, H., Umehara, Y., Higuchi, Y. and Irisawa, K. (1984). "Experimental Studies on Model Clay Ground subjected to Cyclic Wave Loading", Rep. of the Port and Airport Res. Inst., Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan, Vol 23, No 3, pp 127-151(in Japanese).
- Shimosako, K., Takahashi, S., Suzuki, K. and Kang, Y.K. (2001). "Large-Scale Experiments in the Large Hydro-Geo Flume", Proc. of the International Workshop on Advanced Design of Maritime Structures in the 21st Century, PARI, Japan, pp 28-35.
- Takahashi, S., Suzuki, K. and Kang, Y.K. (1999). "Experiments Analysis of Wave-Induced Liquefaction in a Fine Sandbed", Proc. of 23th Int'l. Conference on Coastal Engineering 1998, ASCE, pp 3643-3654.
- Zen, K. (1993). "Study on the Wave-induced Liquefaction in Seabed", Technical Note of the Port and Airport Res. Inst., Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan, No 755, pp 112 (in Japanese).
- Zen, K. and Yamazaki, H. (1990a). "Mechanism of Wave-Induced Liquefaction and Densification in Seabed", Soils and Foundations, Vol 30, No 4, pp 90-104.
- Zen, K. and Yamazaki, H. (1990b). "Oscillatory Pore Pressure and Liquefaction in Seabed Induced by Ocean Waves", Soils and Foundations, Vol 30, No 4, pp 147-161.

2007년 6월 7일 원고 접수

2007년 6월 13일 최종 수정본 채택