

## 파랑작용에 의한 준설토 지반의 안정성에 관한 실험적 연구

강윤구

삼성물산 건설부문 토목사업본부 항만팀

### Experimental Study on the Stability of Dredged Soil Bed under Cyclic Wave Actions

YOON-KOO KANG

Port Management Team, Civil Works Division, Engineering & Construction Group, Samsung Corporation, Sungnam, Gyonggi, Korea

**KEY WORDS:** Dredged mud 준설점토, Cyclic wave actions 파랑의 반복작용, Liquefaction 액상화, Hydraulic model test 수리모형실험, Stability against wave action 내파안정성, Artificial tidal flat 인공갯벌

**ABSTRACT:** Detailed investigations were carried out on the stability of the dredged soil bed against wave actions, aimed at establishing the design method of artificial tidal flats using dredged soil. The soil was dredged at Nagoya port, Japan, and has a mean grain size of 0.013mm. Basic features of artificial dredged soil bed against wave actions were explained from a series of model experiments in a wave flume. The two types of section shapes were employed; one is a horizontal bed and the other is a sloped one. Changes of the bed profile, shear strength, grain size distribution and water content, according to the wave actions, were measured in detail. The cumulative effect of the wave actions, over about one week, was investigated. A dredged soil bed moves with the wave actions with relatively small wave height. It should be especially noted that the clay component is dissolved and flown out, away from the surface layer, and consequently the surface layer hardens, as if it is covered with sand. When the wave height is gradually increased, the bed is not liquefied and the shear strength of the dredged bed is increased by a wave-induced dissipation of pore pressures in the bed and a decrease of clay component by the wave-induced leakage.

#### 1. 서 론

최근들어 연안역 개발에 따른 매립으로 인해 많은 갯벌과 천해역이 급격히 소실되고 있으며, 사회적으로도 커다란 환경문제를 야기시키고 있다. 예를들면, 새만금 간척사업은 환경문제에 부딪혀 민감한 사회적 문제로까지 확대되고 있다. 시화호의 담수화 계획은 수질악화로 인하여 담수화 계획을 포기하고 해수를 유통시키고 있으며, 최근에는 조력발전을 통하여 본격적인 해수 유통을 계획하고 있다. 또한 시화호 상류측에는 유역하천으로부터 유입되는 오염수를 자연을 이용하여 정화시키고자 갈대습지공원을 조성하여 2002년 준공하였다(한국수자원공사). 또한 최근 추진되고 있는 시화단지 조성사업으로 소실되는 갯벌을 대체하고자 인공갯벌조성도 계획하는 등 친환경적 개발로 크게 전환되고 있다. 2006년 4월 해양수산부에서는 그간의 개발에 따른 갯벌상실에 의한 성장위주의 정책으로 1987년 이래 연안습지면적이 20% 이상 상실됐다"며 "갯벌 보전을 위해 2010년까지 갯벌상실을 동반하는 개발사업을 시행할 경우 대체습지 조성을 의무화하는 내용의 법령을 만들어 2011년부터 시행하겠다"고 밝혔다.

우리나라에서뿐만 아니라 일본에서도 최근들어 연안역의 수산어획량이 크게 줄어들고 있으며, 매년 만성적으로 되풀이되고

있는 적조발생의 원인에 대해서도 갯벌이나 천해역의 매립에 의한 해수의 자정능력약화에 있다고 여겨지기 시작하고 있다. 이에 따라 갯벌의 보전과 창출(인공갯벌의 조성)에 대한 사회적 요구가 강하게 고조되고 있다. 이러한 시점에서 일본 정부는 1994년부터 자연과의 공생이 가능한 항만(Eco-port) 개발을 추진해왔으며(WAVE, 2001), 2001년부터는 정부의 개발사업 자체를 '환경재생사업'으로 대대적인 전환을 시도하고 있을 정도로 지금까지의 개발논리에 의해 파손된 자연환경을 재생시켜보고자 많은 투자를 하고 있다.

특히 인공갯벌의 조성은 항내 준설토의 유효이용 측면에서도 적극적으로 검토되고 있다. 습지와 같이 파랑작용이 없는 경우는 안정적인 지형유지가 비교적 쉬운 편이지만, 갯벌의 경우는 대부분이 파랑작용하에 있기 때문에 안정적으로 지형을 유지한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 또한 항내 준설토는 실트 및 점토성분을 다량 함유하고 있기 때문에 이러한 지반에 파랑이 작용했을 때 나타나는 변화특성을 파악하고 이해하는 것은 생물의 안정적인 서식공간 확보와 지형유지의 관점에서 매우 중요하다.

이러한 관점에서 장차 점토성의 준설토를 이용한 인공갯벌조성을 위한 내파안정성에 관한 설계법의 정립은 시급한 과제라 볼 수 있다. 지금까지 파랑작용 하에서의 지반의 안정성에 관한 연구는 대부분이 토질공학적인 측면에서 접근하고 있다. 이는 외력의 발생방식을 진동장치를 이용한 반복하중을 부여하고, 또한 실험에서의 하중부여 시간도 비교적 짧게 하여 비배수 조건으로 다루고 있다(Zen and Yamazaki, 1990a; 1990b, 외 다수).

교신 저자 강윤구: 경기도 성남시 분당구 서현동 263

02-2145-6694 yoonkoo.kang@samsung.com

이러한 방식으로 실험을 행하기 때문에 실제 자연 현장에서와 같이 장시간에 걸쳐서 파랑이 작용하는 경우 파랑에 수평성분에 의한 전단응력이 발생하여 이로 인해 나타나는 지반의 특성변화에 대해 논의하기는 쉽지 않았다.

본 연구는 준설토를 이용한 인공갯벌의 내파안정성에 대한 설계법 정립을 위한 기초단계로서 실제 항만의 준설토를 조파수로에 조성하고 파랑을 발생시켜 수행한 수리실험에서 나타난 흥미로운 현상을 보고하고자 한다.

## 2. 수리모형실험

### 2.1 실험방법

수리모형실험은 한쪽 면이 유리로 되어 있는 길이 36m, 폭 0.48m, 높이 1m의 2차원 조파수로에 흙막이용 잠제를 설치하고, 준설토를 이용하여 모형 지반을 만들어 실시하였다. 실험 단면은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 (a)수평상(Type I)과 (b)사면경사 1/30의 사면상(Type II) 2종류를 대상으로 하였다. 실험에서 사용한 준설토는 일본 나고야항에서 준설한 것으로, 실험에 앞서 구멍의 크기가 5mm인 그물망을 이용하여 조개껍질 등을 걸러내었다. Fig. 2는 준설토의 입도분석 결과이다. 점토성분이 36%, 실트성분이 49%, 모래성분이 15% 정도로서 대부분이 실트-점토로 구성되어 있고, 중앙입경은 0.013mm 정도였다. 액성한계와 소성한계는 각각 60%와 29%정도였다. 또한 지반의 강도조절을 위하여 지반을 형성하고 나서 1일 5일정도 그대로 두어 압밀시켰다.

실험에서는 파랑작용에 따른 지형변화와 전단강도, 입도분포, 함수비, 지반 움직임 등을 측정하였다. 지형변화는 유리면에 부착한 눈금자를 통해 측정하였다. 재료에가 점토성분이 많이 함유되어 있어서 수로의 측면에 부착되는 것을 포함하여 3차원적 변화도 발생하였으나, 이것은 실험 초기 단계에 발생하며, 또한 점토성분의 부유에 의한 탁도가 낮아 실험도중에 수로 내측에서의 지형변화를 확인하기가 어려워 3차원적인 지형변화는 무시하고 유리면에 나타난 지형변화만을 측정하였다. 전단강도는 배인전단(Vane shear) 시험기를 이용하여 파작용 전과 후에 일정 간격으로 측정하였다. 또한 함수비와 입도시험용 샘플채취는 가능한 한 지반에 영향을 미치지 않도록 파랑 작용전과 후, 그리고 사이에서 1회씩 실시하였다.

### 2.2 실험조건 및 해석방법

Table 1은 실험조건을 나타낸 것이다. 파는 주로 주기 1.5초의 규칙파를 이용하였고, 작용시킨 파고는 4.5cm ~ 19.5cm로서 최초의 파(표중의 Wave I)에 의해서 지반이 액상화(유동화)하지 않고 안정하게 된 경우는 이 보다 큰 파고의 파(표중의 Wave II~ Wave VIII)를 계속하여 작용시켰다. 파랑작용 시간은 액상화가 빨리 발생한 경우는 짧게 했지만 대부분 수시간에서 수십시간으로 하였다. 또한 자연상태의 갯벌은 다양한 파작용의 이력을 받으면서 안정된 지반으로 된다는 점에 착안하여 1주간 정도 파랑을 작용시켜 파랑작용의 이력효과에 대해서도 검토하였다.

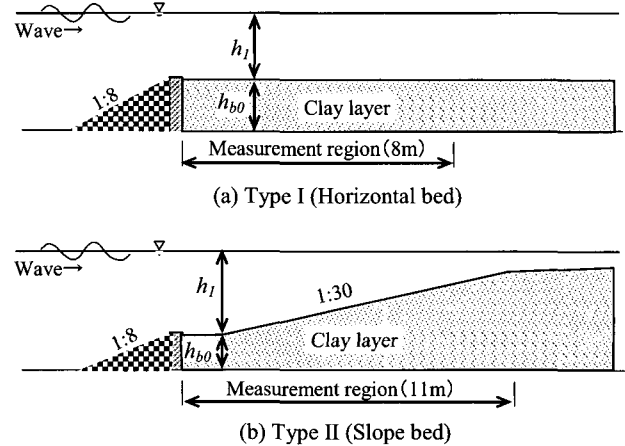


Fig. 1 Bottom types of experimental model

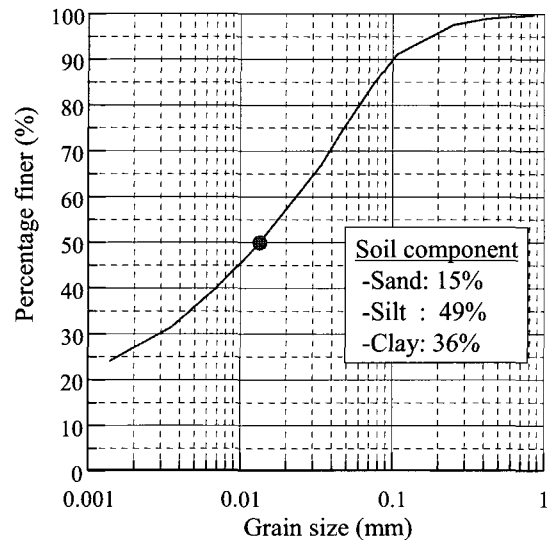


Fig. 2 Grain size accumulation curve of dredged soil

각 조건의 지반을 조성시 이전의 Case에서 액상화가 발생하지 않은 구역은 그 지반의 상층부 5 ~ 10cm정도만 새로운 준설토로 교체하여 혼합하였고, 액상화가 발생한 부분에 대해서는 대부분의 저질을 교체하였다.

본 연구에서 말하는 액상화(Liquefaction)는 파랑작용에 의해 지반이 크게 변형되어 연화된 액체 상태를 뜻하며, 유동화(Fluidization)라고도 표현할 수 있다. 또한 파랑작용 중에는 수중의 지반상황을 관찰하기 어렵고, 점토성의 지반에서는 액상화(유동화)가 천천히 진행하기 때문에 액상화가 발생한 시점을 확인하기란 쉬운 일이 아니었고, Table 1에는 각각의 조건에 대해 액상화가 발생한 대략적인 시간을 기입하였다. 예를들면 Case A-I의 경우 첫 번째 파랑(Wave I)인 파고 5cm의 파랑을 5시간 작용시켰으며, 이 시간동안에는 지반에 액상화가 발생하지 않았고 이보다 파고가 큰 10.5cm의 파랑(Wave II)을 계속해서 4시간 동안 발생시킨 경우이다. 이 경우 액상화는 Wave II 작용 3시간 후에 발생하였다.

**Table 1** Experimental conditions

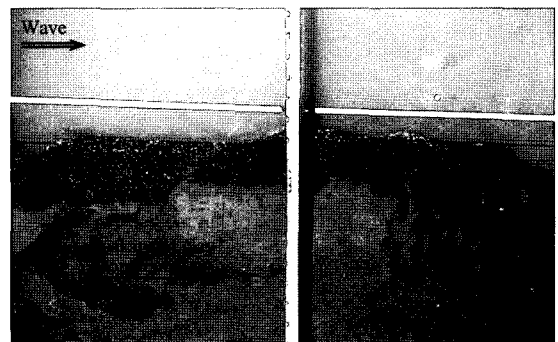
| Bed type       | Case no. | $h_{b0}$ | $h_1$ | Initial bed condition |               | Wave acting condition |  | Liquefaction occurred time on soil bed                |       |       |      |   |                           |
|----------------|----------|----------|-------|-----------------------|---------------|-----------------------|--|---|-------|-------|------|---|---------------------------|
|                |          |          |       | Shear strength        | Water content | Period                | Height, Duration time  |   |       |       |      |   |                           |
| Horizontal bed | A-I      | 24cm     | 27cm  | 572Pa                 | 82.0%         | 1.89s                 | Wave I(5cm, 5hr)<br>→Wave II(10.5cm, 4hr)  | 3hr after Wave II acting                              |       |       |      |   |                           |
|                | A-II     |          |       | 480Pa                 | 83.6%         | 1.13s                 | Wave I(5cm, 2.5hr)<br>→Wave II(9.6cm, 20min)   | 30min after Wave I acting                             |       |       |      |   |                           |
|                | A-III    |          |       | 571Pa                 | 81.2%         | 1.5s                  | Wave I(4.5cm, 27hr)<br>→Wave II(7cm, 25hr)<br>→Wave III(9cm, 10hr)<br>→Wave IV(10.5cm, 6hr)<br>→Wave V(13cm, 6hr)<br>→Wave VI(17.5cm, 4hr)<br>→Wave VII(19.5cm, 6hr) | Non   |       |       |      |   |                           |
|                |          |          |       |                       |               |                       | A-IV   | 36cm  | 456Pa | 79.1% | 1.5s | Wave I(6.3cm, 20hr)   | after 7hr                 |
|                |          |          |       |                       |               |                       | A-V  | 24cm  | 380Pa | 80.4% | 1.5s | Wave I(6.4cm, 45hr)<br>→Wave II(9cm, 68hr)<br>→Wave III(13.4cm, 44hr) | 5hr after Wave III acting |
| Slope bed      | B-I      | 17cm     | 34cm  |                       | 77.0%         | 1.5s                  | Wave I(11.6cm, 3.5hr)  | after 5min  |       |       |      |   |                           |
|                | B-II     |          |       |                       | 77.0%         | 1.5s                  | Wave I(6.1cm, 120hr)<br>→Wave II(11cm, 18hr)   | 1.5hr after Wave I acting<br>6hr after Wave II acting |       |       |      |   |                           |

### 3. 실험결과 및 고찰

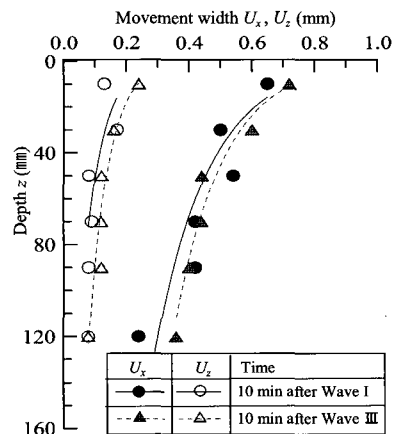
#### 3.1 파작용에 의한 지반운동과 점토성분의 용출

준설토 지반은 비교적 작은 파의 작용에 의해서도 움직이고 또한 점토성분의 용출현상이 발생한다. Photo. 1은 파고를 6.4cm로부터 13.4cm까지 3종류의 파를 연속해서 작용시킨 경우(Case A-V)에 있어서 파랑 작용이 종료된 후의 지반의 상층부의 모습을 보여주고 있다. 사진의 좌측에 점토성분이 기둥모양으로 용출하고 있는 현상이 보이고 있으며, 이 용출 현상에 의해 지반의 상층부가 변색되어 있다. 이와같은 용출현상은 파랑작용에 의해 지반이 움직이고, 이 때문에 지반내의 간극수압이 상승하여 간극수가 배수된 때문으로 볼 수 있다. 이 결과에 의해 지반이 마치 실트나 모래로 피복된 것처럼 변해 있다. 그리고 표층부에는 점토지반에서는 볼 수 없는 사륜(Sand ripple)도 형성되어 있다.

Fig. 3은 Photo. 1의 조건에서 파랑작용에 의한 지반의 움직임을 계측한 결과로서 지반 표층으로부터의 연직 깊이에 따른 움직임의 수평  $U_x$  및 수직  $U_z$  폭을 나타낸다. Wave I(파고 6.4cm)의 파랑 작용시 지반표층에서 지반 움직임의 수평 폭이 0.6mm, 수직 폭이 0.2mm 정도였으며, 지반표층으로부터 12cm 깊이에서도 표층의 절반정도의 움직임을 확인되었다. 이때의 지반 변형율은  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  정도로서 중변형 정도의 탄소성체에 해당된다. 이와같은 점토성분의 용출에 의해 후술하는 바와 같이 지반의 입도분포가 변하며, 지반의 내파안정성이 증가한다.



**Photo. 1** Leakage of clay component by wave action



**Fig. 3** Movement width of soil bed by wave actions

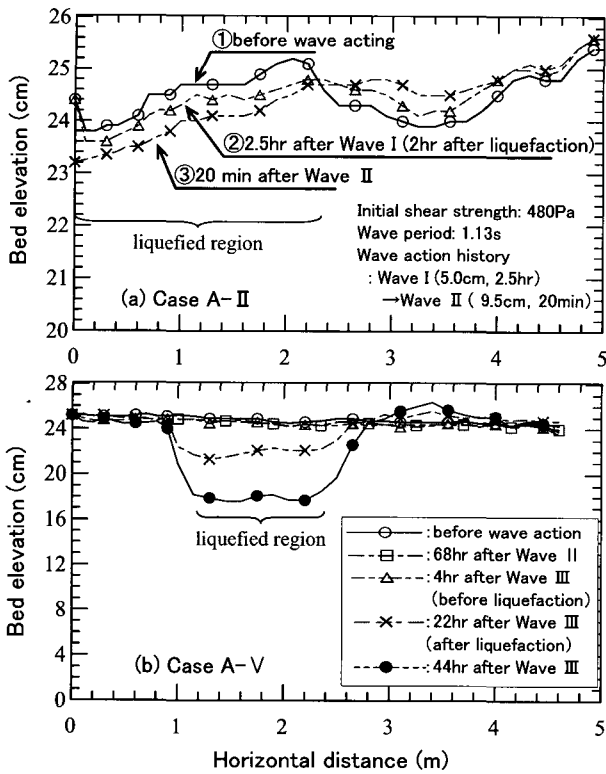


Fig. 4 Bottom profile change of horizontal soil bed under wave action (Case A-II and Case A-V)

3.2 액상화 발생에 의한 지형 및 입도조성 등의 변화

점토성의 준설토 지반은 비교적 작은 파의 작용에 의해서도 액상화(유동화)가 발생하고 지반이 크게 변한다. Fig. 4는 수평상 지반에서 액상화가 발생한 경우에 나타나는 지형변화의 대표적인 2가지의 예를 나타낸다.

Fig. 4(a)는 액상화가 작은 파고에서 비교적 빨리 발생한 경우(Case A-II)로서 파고 5cm의 파작용 30분후에 액상화가 발생하였다. 액상화가 발생한 구간에서는 액상화 발생후 2.5시간 정도의 짧은 시간내에 지반이 0.5~1cm정도 패였고, 패인 토사가 그대로 후방으로 이동되었다. 이와같이 액상화가 비교적 빨리 발생한 것은 초기지반의 전단강도가 파고에 비해 상대적으로 작았기 때문에 나타나는 것이며, 넓은 영역에 걸쳐 지형이 변하는 것이 특징이다.

한편 Fig. 4(b)는 어느정도 파랑작용의 이력을 받고난 후 액상화가 발생한 경우(Case A-V)이다. 이 경우에는 최초의 파고 6.4cm와 계속된 파고 9cm의 파작용에 의해서도 지반이 액상화되지 않고 지반이 어느 정도 다져져 안정하게 된 상태에서 이전보다 큰 파(파고 13.4cm)의 작용 중(개시후 5시간)에 액상화가 발생하였다. 이 경우 비액상화 구간에서는 지반고가 겨우 수mm 정도 낮아졌다. 액상화가 발생한 구간에서는 액상화가 발생하기 전까지는 비액상화 구간에서 나타난 변화경향과 거의 비슷하였지만, 일단 액상화가 발생하면 그 구간에서 지형변화가 급격히

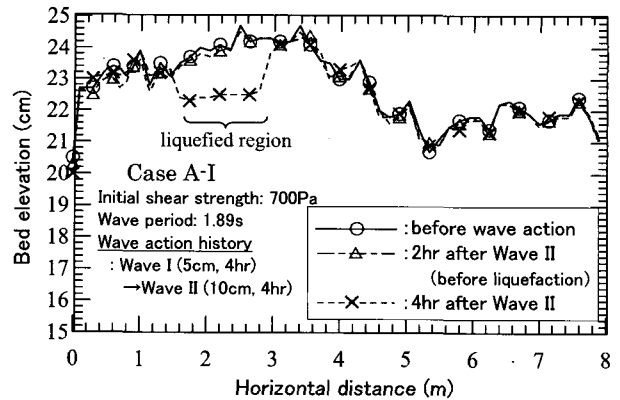


Fig. 5 Bottom profile change of horizontal bed under wave action (Case A-I)

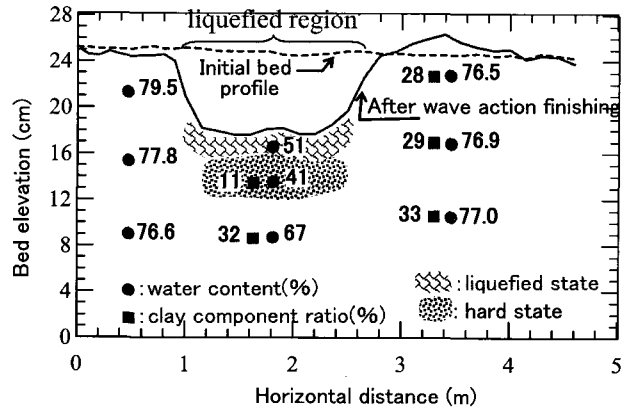


Fig. 6 Bottom state and water content and clay component ratio after wave actions; water component and clay component ratio are 80.4 % and 36 %, respectively

진행하였고, 13.4cm의 파가 44시간 작용한 후에는 지형이 U형으로 패이면서 지반고가 8cm정도 크게 낮아졌다.

Fig. 5는 Case A-I의 경우에 대한 지형변화로서 Fig. 4(b)와 마찬가지로 최초의 작은 파고(5cm)의 파랑에 의해 액상화가 발생하지 않고, 2번째의 파고를 첫 번째보다 약 2배정도인 10.5cm로 크게 하자 지반의 일부분에서 U자형으로 패여 Case A-V의 경우와 비슷한 지형으로 되었다.

Fig. 6은 Case A-V의 경우(Fig. 4(b)와 동일)에 대해서 장시간 동안 파랑을 작용시킨 후의 지반의 상황과 함수비 및 점토성분의 분포를 나타낸 것이다.

먼저 액상화가 발생한 구간에서는 표층은 아직 액상화 상태로 있었지만, 그 하부에서는 두께 3cm정도가 매우 단단한 층으로 변해있었다. 파랑작용 전의 함수비와 점토성분(0.005mm 이하) 비가 각각 80.4%와 36%였지만, 액상화 상태에 있는 표층에서는 함수비가 51%정도였고, 그 하부의 단단한 층에서는 각각 41%와 11%정도로 상당히 낮아져 있다. 단, 그보다 하층에서는 변화가 작은 것으로 나타나 있다. 이와같이 액상화의 발생구간에서 단단한 층이 형성된 것은 파랑작용에 의해서 점토성분이 대량으로

유실되어 실트나 모래질로 변한 지반이 계속적인 파랑작용에 의해서 단단해졌기 때문이다. 다음으로 비액상화 구간에서는 함수비가 초기에 비해서 1~4%정도 낮아졌고, 점토성분은 표층에서 8%정도 줄었으며 그 변화정도는 지반 표층에 가까울수록 크게 나타났다.

현장의 준설토를 이용한 Tsuchida and Gomyo(1999)의 결과에서는 본 연구와 비슷하게 단단한 층이 형성되는 경향이 나타났다. 이와같이 현지에서 준설한 지반에서는 실트나 세립사가 포함되어 있는 경우가 많기 때문에 액상화가 발생한 이후에는 단단한 층이 형성되는 경향이 있다.

3.3 파랑작용에 의한 지반의 전단강도 변화 및 이력효과

Fig. 7은 Fig. 4(b)의 경우(Case A-V)에 대해 파작용에 따른 지반의 전단강도의 시간변화를 나타낸 것이다. 표층으로부터 4cm 하부의 층을 대상으로 하여 액상화가 발생한 구간에서의 전단강도 평균치이다. 연속해서 작용시킨 3종류의 파에 의해서 어느 경우나 강도가 일단 저하한 후 다시 증가해서 거의 일정하게 되는 경향이 나타났다. 파작용에 의한 강도저하는 액상화 발생전의 2종류의 파(파고 6.4cm와 9cm)에 의해서는 약 10% 정도이며, 다시 증가하기까지의 시간은 파작용의 이력을 받은 2번째의 파에 의한 경우가 짧게 나타났다. 3번째의 파랑(Wave III)에 의해서는 저하된 강도가 증가하지 않고 전단강도가 260Pa까지 크게 떨어져 액상화가 발생하였으며, 그후 단단해지는 현상에 의해 파작용 종료 후는 전단강도가 약 3000Pa까지 크게 증가하여, 지반의 안정성이 크게 향상되었다. 이때 지반의 움직임은 거의 나타나지 않았다.

Fig. 8은 액상화가 발생하지 않도록 작은 파고에서부터 파랑을 충분히 작용시킨 후 점차적으로 파고를 증가시킨 Case A-III의 경우의 전단강도의 변화를 나타낸다. 여기서는 파고를 4.5cm부터 19.5cm까지 7단계로 나누어 작용시켰다. 실험에서 조성한 지반을 5일정도 정수상태(그림 중의 'no wave')로 두면 일명 '시멘트'현상에 의해 지반강도가 증가한다. 여기에 파랑(Wave I)이 작용하면 Fig. 7에서 보여준 현상과 마찬가지로 전단강도가 일단 저하(여기서는 약 10%정도)하다가 더 이상 낮아지지 않는다. 이후 다시 정수상태(1일정도)로 두면 전단강도가 다시 증가하고, 파랑을 작용시키면 전단강도가 다시 어느 정도 저하되다가 다시 증가한다. 액상화가 발생하지 않을 정도로 파고를 서서히 증가시키면서 이러한 과정을 파랑발생 개시부터 약 1주일 정도 계속해서 반복하였다. 파랑작용의 이력효과에 의해 이전에 작용한 파고보다 작은 파랑이 작용할 경우는 더 이상 지반강도가 저하하지 않으며, 지반의 강도가 증가해가는 현상을 보여준다.

이와같은 전단강도의 증가에 크게 기여한 것은 앞에서 서술한 바와 같이 파랑작용에 의한 점토성분의 용출과 압밀이며, 간극수압의 상승에 따라 간극수의 배수에 의해서 생긴다. 토질역학적으로도 반복하중에 의한 지반강도의 저하에 대한 연구가 활발히 행해지고 있지만(Yamazaki et al., 1991, 등 다수), 이들의 연구는 주로 비배수조건 하에서 이루어지고 있기 때문에 이러한 현상을 보여주지는 못하고 있으며, 다시 증가하는 강도에 대한 연구는 별로 없다(Matui et al., 1980).

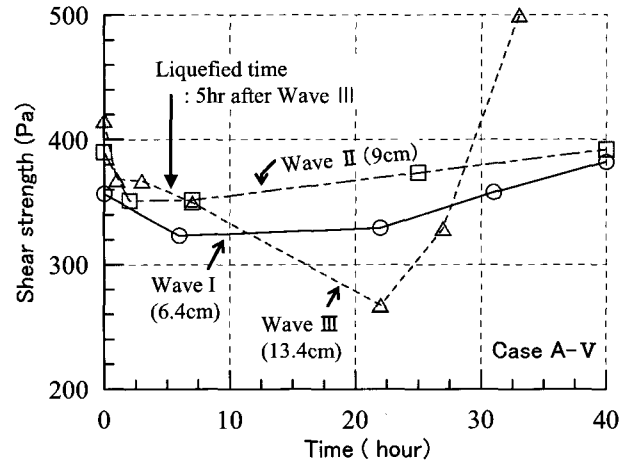


Fig. 7 Variation of shear strength of soil bed during the successive wave actions

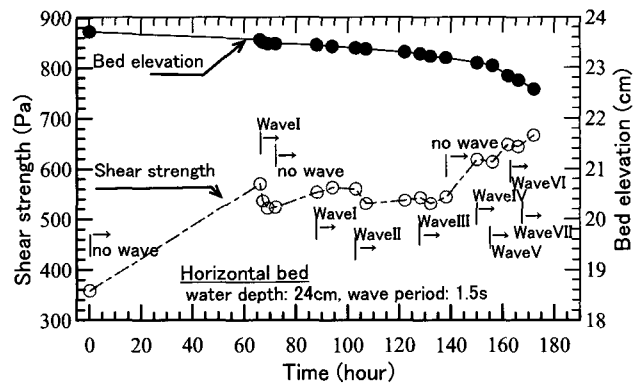


Fig. 8 Variation of shear strength and elevation of bed; Wave height: Wave I(4.5 cm) ~ Wave VII(19.5 cm)

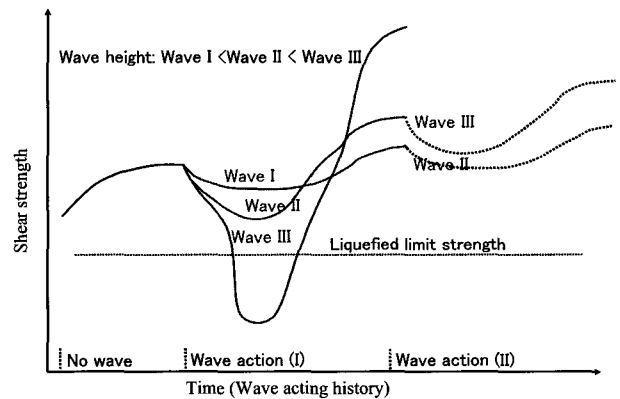


Fig. 9 Schematic illustration of shear strength variation on dredged soil bed by wave acting

항내 준설토를 이용하여 인공갯벌을 조성할 경우 이와같은 지반강도의 특징적인 변화에 주목할 필요가 있다. 즉, 파랑장에 점토성 준설토로 지반을 조성할 경우 적절한 파랑제어와 병행할 경우 비교적 안정된 지반조성이 가능함을 의미한다.

Fig. 9는 Fig. 7과 Fig. 8의 결과를 종합하여 점토성 준설점토를 이용하여 조성한 지반위에 일련의 파랑이 작용하는 경우에 지반 전단강도의 변화를 모식한 것이다. 여기서는 준설토의 시멘트 현상, 파랑작용시 일시적으로 저하된 후 다시 상승하는 전단강도 그리고 이전의 작용파랑보다 큰 파고의 파랑작용시 나타나는 강도저하 현상이 나타나 있다. 그리고 이전의 작용파랑의 이력효과에 비해 상대적으로 큰 파랑작용시의 지반의 파괴(액상화 혹은 유동화)와 이후 계속되는 파랑작용에 의한 지반의 안정화 과정을 적절히 묘사하고 있다.

이러한 현상에 대해 현재까지의 단계에서는 정성적인 특성만을 보여주고 있지만, 좀더 본격적인 검토를 수행할 경우 정량적인 기준제시도 가능할 것으로 판단된다. 향후 이러한 점에 착안하여 지속적인 자료축적이 필요할 것으로 본다.

3.4 사면상의 실험결과

Fig. 10은 사면상의 지반에 파고 6.1cm(120 시간)와 11cm(18 시간)의 파를 작용시킨 경우(Case B-II)의 지형변화와 함수비를 나타낸 것이다. 그림 중의 숫자는 함수비이며, 파랑작용 전의 조성지반의 함수비는 77%정도 였다.

이 경우에서는 파고 6.1cm의 파를 1.5시간 작용시켰을 때, 쇄파점(잠재배후로부터 7m지점)을 중심으로 액상화가 발생하였다. 그후 액상화된 지반에 의한 파랑에너지 감쇄로 인하여 쇄파점이 육지 측으로 이동하여 8m~10m사이에서 다시 액상화가 발생하였고, 파고 6.1cm의 파작용이 종료될 무렵에는 액상화가 거의 종료되고, 지반표면 부근이 단단해진 상태로 되었다. 그후 파고 11cm의 파에 의해서 액상화 영역이 조파기 쪽으로 확대되면서 초기의 지반경사보다 완만해지고 있다.

함수비 및 지반의 상태는 Fig. 6의 수평상에서와 거의 비슷한 경향을 보여주고 있다. 함수비의 변화는 액상화 발생구간에서 가장 크며, 지형의 변화가 작은 전면구간(Region I)에서는 1, 2% 정도로 거의 변하기 않았다. 액상화가 발생하지 않았던 바(Bar)에서는 함수비가 오히려 10%정도 낮아졌다. 또한 바에서는 의외로 단단해지지 않았고 전단강도는 비액상화구간과 거의 비슷한 정도였다. 이 상태에서 동일한 파를 10시간 정도 계속해서 작용시키자 액상화 구간의 후방에 있는 바가 붕괴되었고, 결국은 최초의 경사 1/30의 지형의 모습은 없어졌고 거의 평탄한 상태로 되었다. 이와같은 지형은 Kang et al.(2001)에 의한 일본 현지 갯벌에서도 종종 볼 수 있는 형상이다. 점토성 갯벌이 많은 우리나라의 남·서해안의 갯벌에서의 지형특성 및 지반특성과의 비교는 향후 조사과제로 남겨둔다.

한편, Fig. 11은 Case B-I의 경우로서 Fig. 10에서 보여준 Case B-II와 동일한 지반조건 하에서 첫 번째 발생시킨 파랑 Wave I을 Case B-I의 Wave II과 비슷한 파고의 파랑을 발생시킨 경우이다. 이 경우는 파랑작용에 의해 지반이 크게 움직였고, 파랑작용 개시후 수분정도에 이미 액상화가 발생하여 지반 형상이 변하기 시작하여 저질이 외해 측(조파기 쪽)으로 이동하여 3.5시간 정도 경과 후에는 6m 정도에 걸쳐 평탄하게 되었다.

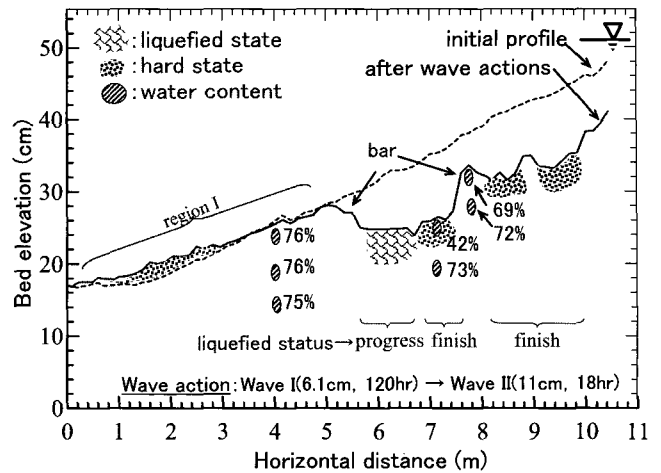


Fig. 10 A typical bed profile and water content for sloped bed at Case B-II (Wave period 1.5 s, initial water content 77 %)

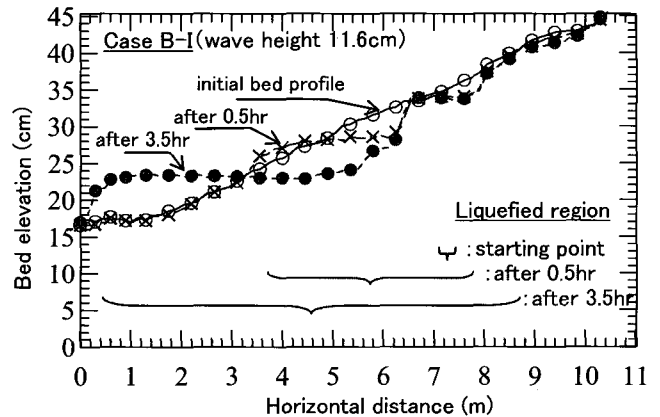


Fig. 11 Variation of bed profile for sloped bed (Case B-I)

4. 결 론

본 연구에서는 실트 및 점토성분을 다량으로 함유하고 있는 항만의 준설토를 이용하여 조파수로에 지반을 조성하고 파랑을 작용시켜 지반의 변화특성을 실험적으로 고찰한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비교적 작은 파에 의해서도 지반이 움직이고, 지반내부로부터 점토성분의 용출현상에 의해 지반의 안정강도가 커진다.
- (2) 일단 지반에 액상화가 발생하면 지반이 크게 움직이고, 점토를 포함한 세립성분이 다량으로 유실되어 지형이 크게 변하며, 지반표면 부근이 매우 단단한 층으로 변한다.
- (3) 파작용의 이력을 적절히 부여함으로써 지반의 안정강도가 증가한다.
- (4) 사면상(Slope bed)의 경우는 쇄파대 부근에서 액상화가 발생하는 경우가 많으며, 액상화한 경우는 장시간의 파작용에 의해서 지반이 U형으로 패이고, 결국은 매우 평탄한 지형으로 변한다.

지반을 조성한 초기의 지반강도와 작용파랑에 의한 전단응력의 관계로부터 액상화 발생과 전단강도의 증가에 대한 정량적인 평가 모델구축이 남아있다. 그리고 점토성 갯벌의 실제 현장의 지형 및 지반특성과의 비교·검토는 향후 조사과제이다.

## 참 고 문 헌

- 한국수자원공사. "시화호 갈대습지공원V", <http://www.kowaco.or.kr/>
- Kang, Y.K., Takahashi, S., Okudaira, A. and Kuroda, T. (2001). "Field Survey on Natural and Artificial Tidal Flats -Stability of Foreshore Tidal Flats against Wave Actions-, Technical Note of the Port and Harbour Res. Inst., Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan, No 1011, 78p(in Japanese).
- Matui, T, Ohara, H. and Ito, T. (1980). "Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay", J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 106, No 3, pp 1101-1120.
- Tsuchida, T. and Gomyo, M. (1999). "On the Stability of seabed under the Cyclic Pressure Change due to Waves", Annual J. of Coastal Engineering, JSCE, Vol 46, pp 596-600(in Japanese).
- WAVE (2001). "Introduction, Guideline for the conservation and creation of ecosystems in relation to coastal development", Vol 1, Waterfront Vitalization and Environment Research Center, Tokyo, Japan, 117p.
- Yamazaki, H., Zen, K., Kagaya, H. and Tachishita, T. (1991). "Strength and deformation characteristics of clays due to cyclic loading", Rep. of the Port and Harbour Res. Inst., Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan, Vol 30, No 4, pp 65-83(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.

2006년 5월 19일 원고 접수

2006년 8월 3일 최종 수정본 채택