

파랑에 의한 방파제 케이슨 침하 경향 및 원인 분석: 침하 계측자료를 중심으로

Characteristics and Causes of Wave-Induced Settlement in Caisson Breakwater: Focusing on Settlement Data

김 태 형¹ Kim, Tae-Hyung

남 정 만² Nam, Jung-Man

김 인 석³ Kim, In-Sok

윤 성 규⁴ Yun, Seong-Kyu

Abstract

So far, studies on the settlement of breakwater have mainly been conducted through numerical model tests focusing on an analysis or through the laboratory wave tank tests using a scaled model. There has not been a study on the settlement that is measured in an actual breakwater structure. This study analyzed the data of settlement that has been measured in an actual caisson breakwater for a long time and the characteristics and causes of wave-induced settlement in the caisson (including beneath ground), based on qualitative aspect, were examined. The analysis revealed that wave clearly has an effect on the settlement in caisson, especially in the condition of high wave such as typhoon. Caisson settlement is caused by the liquefaction of ground, which is due to the increase of excess pore pressure, the combination of oscillatory excess pore pressure and residual excess pore water pressure, and the solidification process of ground due to dissipation of the accumulated excess pore pressure. The behavior of excess pore pressure in the ground beneath the caisson is entirely governed by the behavior of the caisson. Ground that has gone through solidification is not likely to go through liquefaction in a similar or a smaller wave condition and consequently, the possibility of settlement is reduced.

요 지

지금까지의 방파제 침하와 관련된 연구는 주로 해석위주의 수치모형실험 또는 축소모형을 이용한 실내수조모형실험을 통해 이루어졌다. 현재까지 실제 방파제 구조물에서 계측된 침하를 이용한 연구는 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 실제 케이슨 방파제에서 장기간 계측된 침하 자료를 분석해 정성적인 측면에서 파동에 의한 케이슨의(하부지반 포함)침하 경향과 그 원인을 분석하였다. 분석 결과, 케이슨 침하에 파랑의 영향이 있음을 분명하게 확인할 수 있었다. 특히 태풍과 같은 고파랑 조건에서는 그 경향이 뚜렷하게 나타났다. 케이슨 침하는 파랑에 의한 해저지반에서의 진동 과잉간극수압과 잔류과잉간극수압의 합으로 표현되는 과잉간극수압의 증가에 의한 지반의 액상화와 축적된 과잉간극수압의 소산에 따른 지반의 고밀도화 과정을 통해 발생된다. 케이슨 하부 지반의 과잉간극수압 거동은 전적으로 케이

1 정회원, 한국해양대학교 공과대학 건설공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ., Tel: +82-51-410-4465, Fax: +82-51-410-4460, kth67399@kmou.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 정회원, 송하건설 이사 (Member, Director, Songha Construction Co.)

3 비회원, 제주특별자치도 도로관리사업소 도로안전관리과장 (Chief, Road Management Center, Jeju Special Self-Governing Province)

4 정회원, 교토대학교 공학연구과 도시사회공학전공 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Urban Management, Kyoto Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2014 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은 거동에 지배된다. 고밀화과정을 경험한 지반은 동급의 또는 그 보다 작은 파랑 조건에서는 액상화 발생 가능성이 현저하게 줄어들어 결과적으로 침하 발생도 감소된다.

Keywords : Oscillatory pore water pressure, Residual pore water pressure, Liquefaction, Progressive solidification, Wave-induced settlement, Caisson Breakwater

1. 서론

Fig. 1(a)는 제주외항 서방파제의 일부 케이슨에서 2003년부터 2007년까지 측정한 시간-침하 데이터의 개략적인 모식도이다. 케이슨이 놓인 이 지역의 하부 지반은 대부분 모래지반으로 구성되어 있다. 그래서 케이슨 설치 후 그 무게와 수압으로 인해 모래지반에서 주로

발생하는 즉시침하가 일어난 것을 알 수 있다(A 구간). 이것은 점토와 달리 사질토지반에서 침하는 일반적으로 즉시침하가 지배적이기 때문이다(Budhu, 2010). 포화된 사질토 지반에 하중을 가하면 간극수압이 갑자기 증가하는데 사질토에서는 투수계수가 커서 간극수압이 증가함에 따라 간극수가 즉시 배수되어 지반의 부피 감소를 수반하여 결과적으로 지반침하를 가져온다.

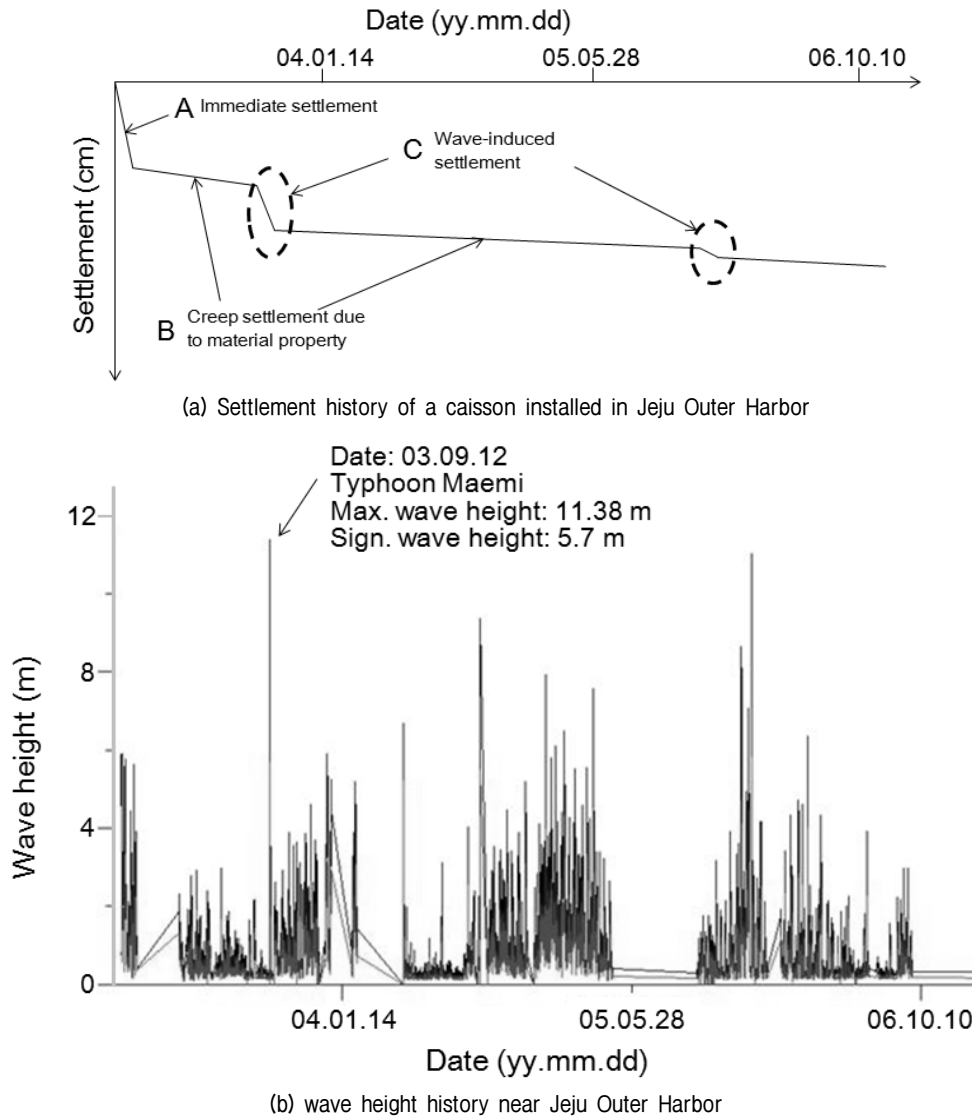


Fig. 1. Settlement and wave height histories in Jeju Outer Harbor

시간-침하 곡선에서 B 구간을 보면 즉시침하 외 상당한 시간동안 침하가 계속적으로 발생된 것을 알 수 있다. Cho(2007)는 이 침하의 원인을 이 지역의 모래가 어패류에 의해 형성된 탄산염이 포함되어있어 이런 크리프 침하가 발생하는 것이라 하였다. 이것은 케이스에 의한 하중재하 상태에서 하부의 모래지반에서 탄산염 성분 모래의 파쇄와 이로 인한 입자의 재배열 때문이다. 탄산염 성분의 모래는 동일 하중상태에서 일반 모래에 비해 파쇄정도가 큰 것을 압축시험전후 입도분석 시험을 통해 확인하였다(Kim et al., 2008).

한편, Fig. 1(a)에서 또 하나 즉시침하와 탄산염에 의한 침하현상 외에 또 다른 침하가 C 구간에서 급속하게 발생되었음을 알 수 있다. 이러한 급속한 침하는 탄산염 성분 모래에 의해 발생 되었다고 보기는 어렵다. 왜냐하면 발생된 침하량이 상당히 크며 단시간에 발생된 특징을 보이기 때문으로 B 구간에서 발생된 침하경향과는 다른 양상을 보인다. C 구간에서 발생된 침하는 파랑 작용에 의해 발생된 침하로 볼 수 있다. C 구간의 침하 발생 시기는 공교롭게도 Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 이 지역에 큰 파랑이 발생된 시기와 일치한다. 이처럼 침하량 예측 결과를 통해 사질토 지반에 해안구조물이 건설될 경우 탄성침하, 모래 등의 재료특성으로 인한 크리프 침하, 그리고 파랑에 의한 침하가 추가적으로 발생함을 알 수 있다.

해안구조물과 그 주변 해저지반은 파랑에 의한 반복 하중을 받는 위치에 있어 육상구조물의 거동과는 상당히 다른 특징을 보인다는 것을 다른 연구자들에 의해 밝혀졌으며 그와 관련된 연구가 많이 진행되어 오고 있다(Mei and Foda, 1981; Hsu and Jeng, 1994; Okusa, 1985; Kianto and Mase, 1999; Yuhi and Ishida, 2002; Sekiguchi et al., 1995; Miyamoto, et al., 2004; Sassa and Sekiguchi, 1999; Sassa and Sekiguchi, 2001; Sassa et al., 2001). 이런 연구는 주로 파동에 의한 해저지반의 액상화와 관련된 연구로 진동과잉간극수압(oscillatory pore water pressure)(Madsen, 1978; Yamamoto et al., 1978)과 잔류과잉간극수압(residual pore water pressure)(Seed and Rahman, 1978; Sumer and Fredsøe, 2002)과 관련된다. 사실 여기서 과잉간극수압은 궁극적으로 소산되기 때문에 잔류(residual)라는 용어는 적절한 표현은 아니나 진동과잉간극수압과 구별하기 위해 암묵적으로 잔류라는 용어를 사용하고 있다(Lee et al., 2014).

방파제 등의 해안구조물이 설치된 해역에서 해저지

반내 과잉간극수압 등의 동적거동을 검토한 해석연구로는 Mase et al.(1994), Ulker et al.(2010), Li and Jeng (2008), Kang et al.(2013) 및 Ye et al.(2014) 등의 다수를 들 수 있다. Mase et al.(1994), Ulker et al.(2010), Li and Jeng(2008) 및 Ye et al.(2014)은 다공질탄성지반의 가정하에 얻어지는 Biot의 압밀방정식(Biot, 1941)을 기초방정식으로 2차원 혹은 3차원파동장에 설치된 방파제 주변에서 지반내 유효응력, 진동 및 잔류간극수압 등의 동적응답과 액상화 가능성을 평가하였다(Lee et al., 2014).

방파제 관련 실내수조실험연구로는 Zen and Yamazaki (1990a; 1990b), Kudella and Oumeraci(2004a; 2004b), Kudella et al.(2006) 등을 들 수 있다. Zen(1993)은 모래 지반에 대해 연직방향의 진동압(Oscillatory pressure) 발생 장치를 이용한 모형실험을 통해 지반내의 진동간극수압에 의한 액상화에 의해서 구조물의 침하가 발생할 수 있다는 점을 강조했다. Kudella et al.(2006)은 케이스 하부 지반의 과잉간극수압의 발생 메카니즘을 실험을 통해 증명하였다.

이들 방파제와 관련된 연구는 주로 파랑 영향을 보여주기 위한 해석위주의 수치모형실험 또는 축소모형을 이용한 실내수조모형실험 연구들이다. 현재까지 방파제 구조물에서 실제 예측된 결과를 이용한 해저지반의 액상화 연구는 잘 이루어지지 않았다. 이것은 방파제라는 해양구조물 특성상 예측자체가 어려운 환경에 놓여있기 때문으로 판단된다. 본 연구는 기존 연구의 확대 측면에서 실제 방파제에서 장기간 예측된 구조물의 침하 자료를 분석해 정성적인 면에서 파랑에 의한 해양구조물(하부지반 포함)침하 경향과 원인을 분석해 보았다.

2. 현장의 토질 및 파랑 특성

제주외항 서방파제 설계 및 공사 시 시추조사 결과에 의하면 해저지반고는 해상표고(-)12.78~(-)22.62m이며, 이 지역의 기초지반의 성층 상태는 지표로부터 해성퇴적토층, 기반암의 풍화암층 및 연암층으로 구성된다. 본 연구의 주 대상지반인 해성퇴적토층은 해수에 의해 운반 퇴적되어 형성된 지층으로서 약 10m 내외의 두께로 분포하고 있으며, 토성은 세립 내지 중립의 모래(SP), 실트질 모래(SM)로 구성되어 있으며 부분적으로 다량의 조개껍질 및 실트를 함유하고 있다(Fig. 2). 표준관입 시험에 의한 N치는 9~35의 범위로서 위치 및 심도에 따라 다소 변화하나 전반적으로는 보통 조밀함 내지 조

밀한 상태의 상대밀도를 나타낸다.

2002년부터 2010년까지 방파제 공사 중 수압식파고계(self-recording wave gauge)를 설치하여 파고와 파향 등을 관측하였다. 본 현장의 파고 계측지점의 위치는 방파제 전면 500m에 위치하여 제체에 의한 반사등의 영향을 최소화시켰다(Fig. 3 참조). Table 1은 관측 자료 중에서 최고파고 5m 이상 되는 것만을 정리한 것이다.

공사기간 동안의 관측된 파랑 중 두 번의 큰 파랑이 태풍매미(03.09.12)와 나리(07.09.16)에 의해 발생되었다. 태풍매미 시 최대파고 11.38m 최대주기 7.8s, 태풍나리 시 최대파고 13.7m, 최대주기 9.8s를 기록하였다. 2005년 12월 21일에는 태풍과 관계없이 단지 풍랑에 의해 11.01m의 파고가 기록되었다.

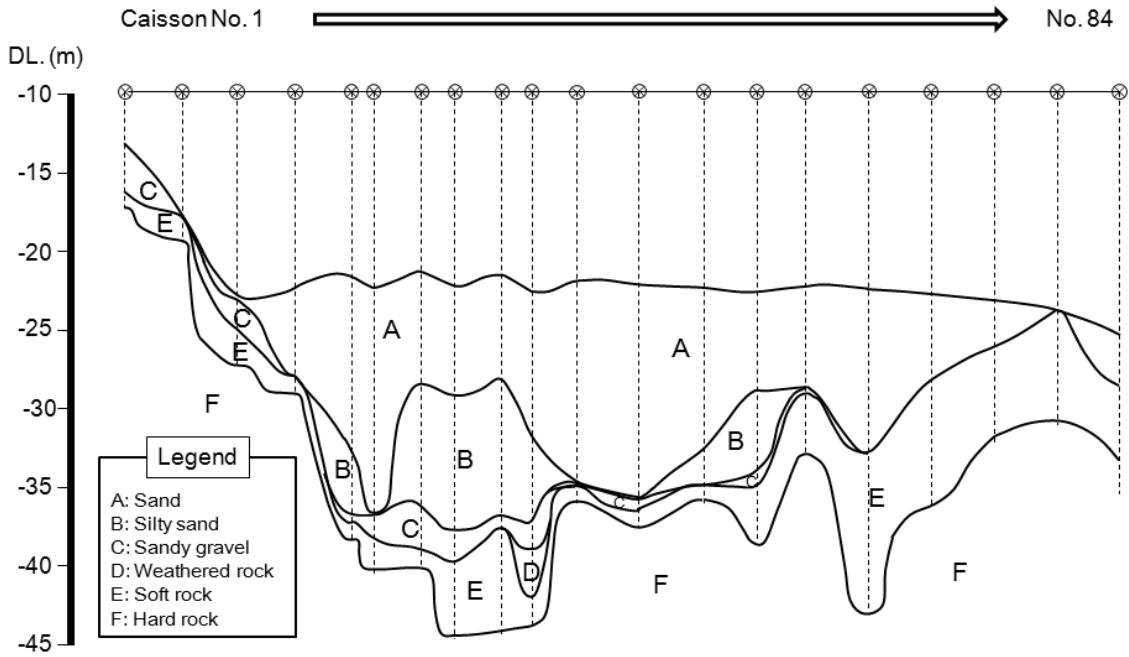


Fig. 2. Boring location and soil profile at West breakwater in Juju Outer Harbor

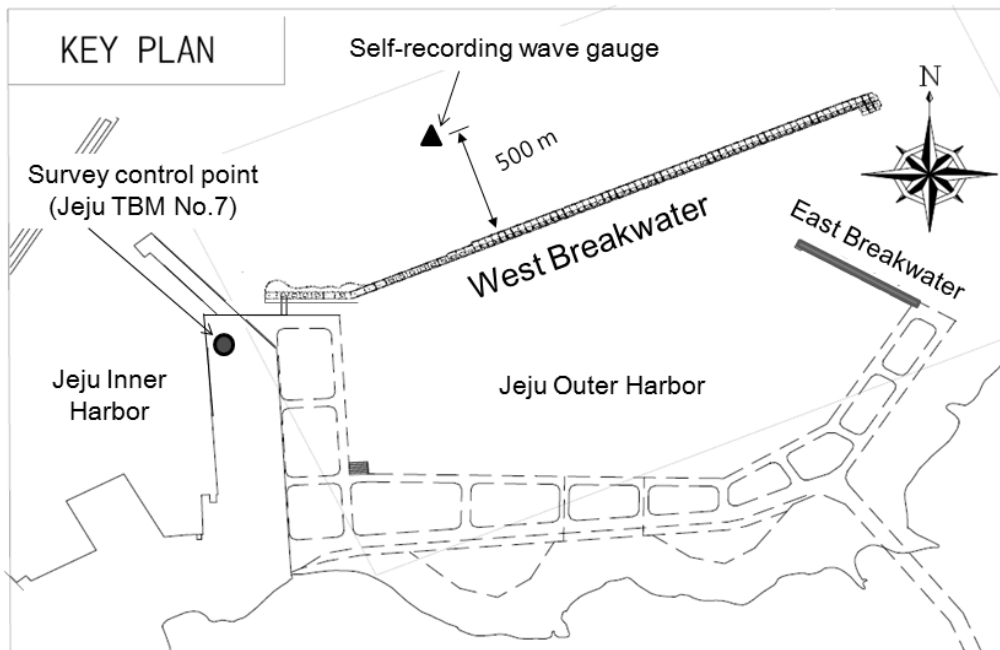


Fig. 3. Plane view of west caisson breakwater including settlement survey point and installation point of self-recording wave gauge

Table 1. Data measured by wave gauge

Date (yy.mm.dd)	Max. wave height (m)	Max. wave period (s)	Velocity (m/s)	Flow direction	Wave direction	Note
02.12.30	5.91	5.6	0.05	NNW	SW	
03.01.05	5.76	7.3	0.07	NW	NNW	
03.01.20	5.63	9.3	0.13	N	NNW	
03.09.12	11.38	7.8	0.08	WSW	N	Typhoon Maemi
03.12.19	5.90	6.5	0.06	N	NNW	
03.12.26	5.23	5.8	0.07	NNE	NW	
04.02.05	5.18	6.7	0.11	N	NNW	
04.11.26	5.20	8.0	0.12	NW	NW	
04.12.31	7.91	8.0	0.11	NNW	NW	
05.01.16	6.10	17.2	0.23	N	NW	
05.02.01	6.49	8.2	0.02	N	NW	
05.02.19	5.53	6.3	0.06	NW	NW	
05.03.12	5.56	5.9	0.15	NNW	NW	
05.03.24	7.57	7.1	0.08	WNW	NW	
05.12.04	8.64	11.6	0.11	WNW	NW	
05.12.17	7.07	9.1	0.16	WSW	NW	
05.12.21	11.01	9.7	0.07	WNW	NW	Storm warning
06.03.28	6.35	7.2	0.05	NW	NW	
07.09.16	13.70	9.8	0.08	WNW	WSW	Typhoon Nari
07.12.30	7.31	10.7	0.06	NE	NW	
08.02.23	5.00	7.2	0.17	W	NW	
08.11.28	6.71	7.4	0.05	NNE	NW	
08.12.05	7.41	9.5	0.01	ESE	NW	
08.12.22	5.64	9.2	0.03	WNW	NW	
09.01.01	5.15	7.8	0.11	WSW	NNW	
09.01.10	6.28	8.2	0.06	WSW	NNW	
09.01.23	7.49	7.9	0.08	SW	NW	
09.03.13	5.83	7.3	0.09	WSW	NNW	
09.11.02	5.69	7.6	0.02	W	NW	
09.12.31	5.79	7.3	0.14	W	NW	
10.03.10	6.89	7.5	0.07	S	NW	
10.03.21	5.54	9.3	0.14	SW	NW	

3. 케이슨 침하 계측

3.1 계측방법

방파제 축조 공사 시 해상에 설치된 케이슨이 충분히 안정화 되었는지 여부를 판단하는 것이 매우 중요하다. 따라서 케이슨 설치 후 케이슨의 침하에 대한 계측을 계획하였다. 케이슨의 침하에 대한 정확한 계측을 위해서는 케이슨 하부에 침하계를 설치하여 지반 침하를 분석하고 케이슨 상부의 변형에 대한 레벨측량을 병행하는 것이 계측결과에 대한 상호보완을 하는 좋은 방법이

라고 할 수 있다. 하지만, 제주외항 현장의 경우 케이슨 하부에 침하계 설치가 이루어 지지 않아 단지 레벨측량에 의한 방법만을 사용하였다. 그래서 침하가 단지 레벨측량에 의해서만 실시한 관계로 측량에서 발생하는 오차에 대한 보정을 할 수가 없었다. 그래서 연구의 중점을 계측에서 측정된 침하량 보다 침하가 발생하는 경향에 대한 거동 분석과 침하가 발생한 시점에 중점을 두었다. Fig. 3은 레벨측량 위치도로 국립해양조사원 제주 TBM(No.7)을 케이슨 측량기준점으로 삼고 케이슨이 거치되는 순간부터 침하를 측정하였다. 그리고 본 연구에 사용된 케이슨은 그림에서 나오는 서방파제 부분이

되겠다.

케이슨의 침하계측은 각 케이슨의 바다쪽에 위치하는 모서리로부터 번호를 1에서 4까지 부여하여 각 모서리에 대한 침하량을 측정하였다(Fig. 4(a)). Fig. 4(b)는 No.6 케이슨에 대한 각 모서리에서 측정된 침하량 값을 각각 도시한 것이다. 본 연구에서는 편의상 4개의 모서리에 대한 측정된 값의 평균값을 분석에 사용하였다.

3.2 케이슨 설치

서방파제에는 총 84개의 케이슨이 설치되었는데, 케이슨의 설치 순서는 서방파제의 서쪽에서부터 5번째에 있는 No.5가 가장 먼저 설치가 되었고 그 다음은 가장 서쪽에 위치하는 No.1, 2, 3, 4를 설치하여 No.5와 연결하였고 No.6부터는 번호순서대로 동쪽으로 설치되었다. 제주 외항 서방파제에 사용된 케이슨은 무공케이슨

과 곡면슬리트 케이슨, 확폭슬리트케이슨, 그리고 이형곡면슬리트케이슨의 4가지 종류다. 케이슨 종류별 설치 순서를 살펴보면 서방파제의 가장 서쪽 부분에 19개의 무공케이슨을 먼저 설치하였다. 그 다음으로 No.20과 21의 확폭슬리트케이슨 2개가 설치되었다. 다음은 No.22에서 No.31까지의 곡면슬리트케이슨이 설치되었다. 다시 No.32와 33의 확폭슬리트 케이슨 2개가 설치되었다. 여기서 다시 곡면슬리트케이슨이 No.34에서 No.43, No.47에서 No.56, No.59에서 No.68, No.71에서 No.78이 설치되었고 곡면슬리트케이슨 사이에 확폭슬리트케이슨이 No.44, 45, 46, 57, 58, 69, 70이 설치되었으며, 마지막으로 서방파제의 동쪽 끝부분을 완성하기 위하여 이형곡면슬리트케이슨이 No.79에서 84까지 설치되었다. 다시 정리하면 제주외항 서방파제에 사용된 케이슨은 무공케이슨이 19개, 곡면 슬리트케이슨이 48개, 확폭슬리트케이슨이 11개, 이형곡면슬리트가 6개, 총 84개의

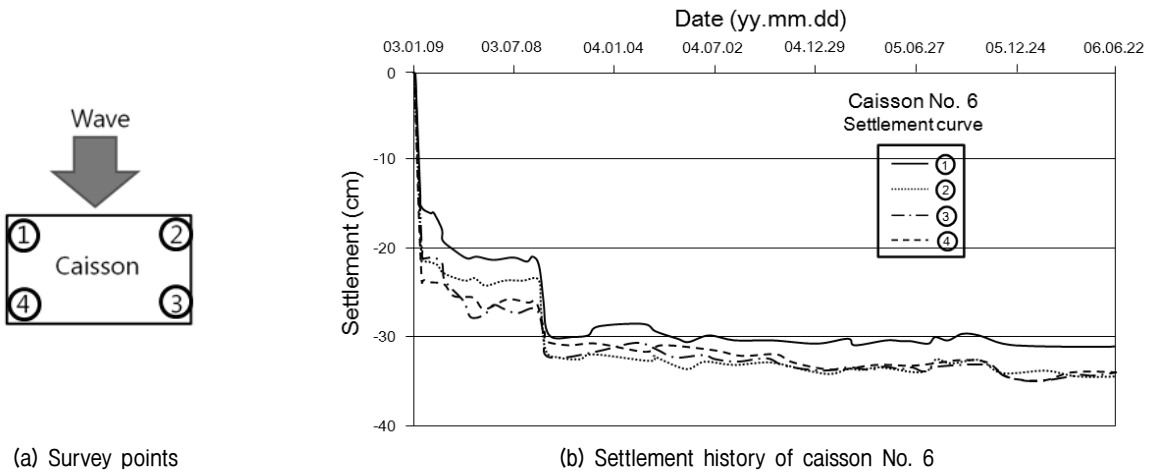


Fig. 4. Caisson settlement measurement method: (a) Survey points of caisson and (b) Settlement history of each survey point of caisson No. 6

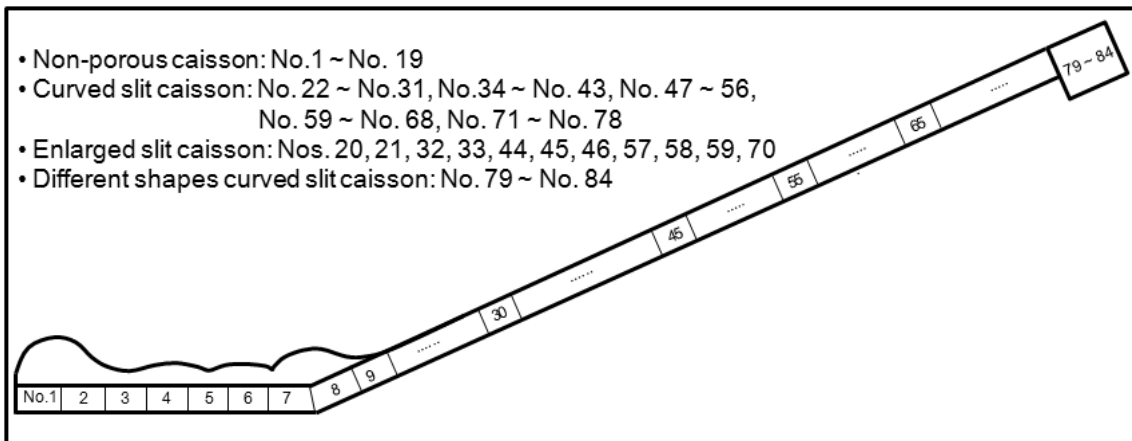


Fig. 5. Schematic diagram of installed caissons in Jeju West breakwater

케이슨이 사용되었다.

3.3 침하계측결과

Fig. 6은 제주도 외항 서방파제에 거치된 84개의 케이슨에 대한 침하를 케이슨의 설치시점과 형태에 따라 4가지로 분류하여 도시한 것이다. 그림에 케이슨 침하에 크게 영향을 미쳤을 것으로 판단되는 파고 높이와 발생한 일자를 수직점선으로 같이 표시하였다. 침하와 태풍과의 관계는 4장 결과분석에서 구체적으로 다루고 이 장에서는 계측된 침하 결과만을 서술하고자 한다.

Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 제주 외항 방파제의 가장 서쪽에 설치된 19개의 무공케이슨중에서 일부 케이슨에 대

한 침하를 도시하였다. 태풍매미(파고 11.38m)가 발생한 2003년 9월 12일을 기준으로 태풍 발생전에 거치된 No.1에서 No.10 까지 케이슨 중에서 No.4, 6, 8, 9 케이슨의 침하기록을 Fig. 6(a)에 도시하였다. 태풍매미 이후에 거치한 No.11에서 No.19 케이슨 중에서 No.11, 12, 16, 18 케이슨의 침하기록을 Fig. 6(b)에 도시하였다. Fig. 6(a)를 살펴보면 각각의 케이슨 침하는 차이가 있지만 설치 후 초기 침하 발생 후 일정량의 완만한 침하를 보이다가 특정 시점에 큰 침하를 보이고 다시 완만한 경사를 보이는 침하형태가 반복되고 있다. Fig. 6(b)를 보면 2004년 10월경부터 설치되기 시작한 케이슨의 경우 2005년 1월경까지는 각각 경사에 차이는 보이고 있지만 지속적인 침하를 보이다가 2005년 3월 24일경 무

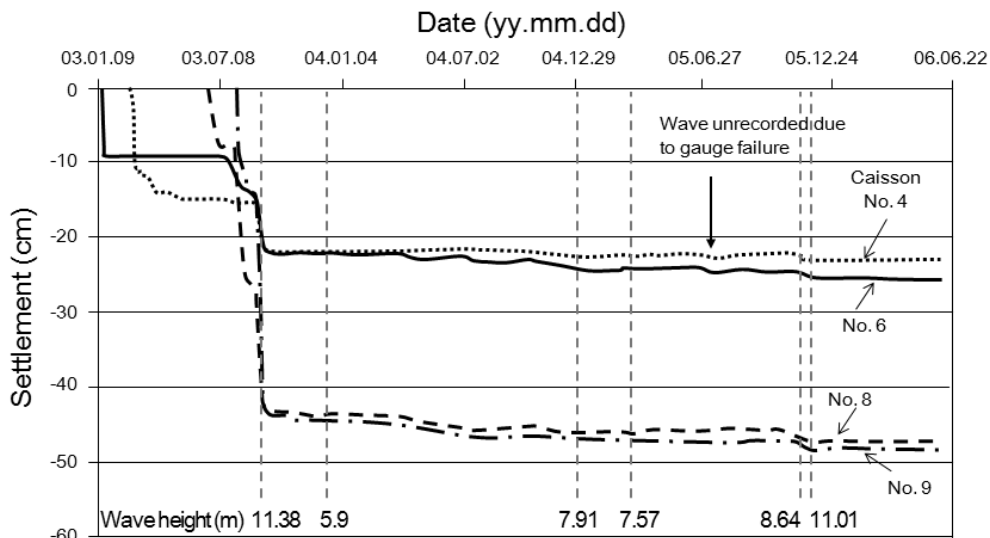


Fig. 6. (a) Settlement history of non-porous caissons of Nos.4, 6, 8, and 9 installed before typhoon Maemi

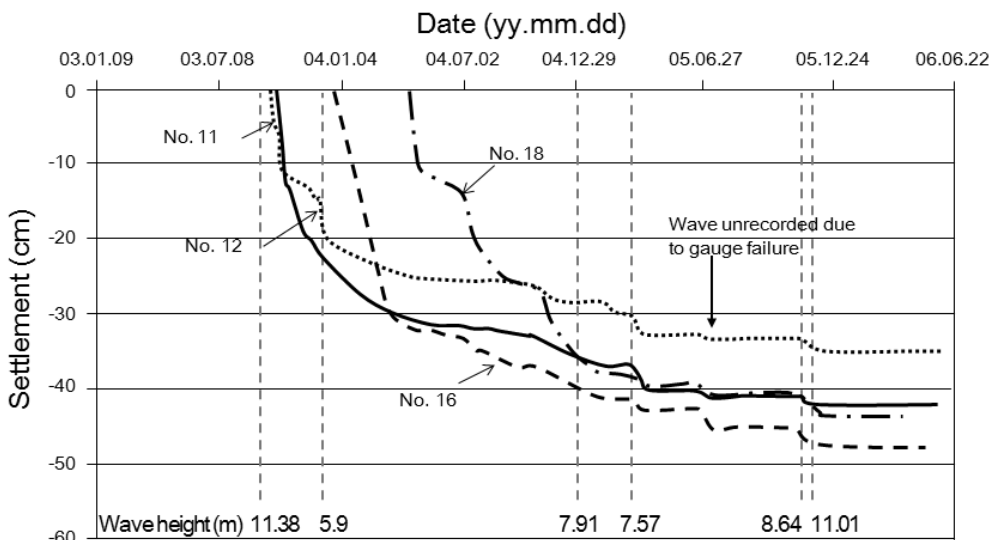


Fig. 6. (b) Settlement history of non-porous caissons of Nos. 11, 12, 16 and 18 installed after typhoon Maemi

렵에 급격한 침하가 보이는 것으로 나타나고 있다. 이후 다시 완만한 경사를 보이다가 2005년 7월경에 급격한 침하를 보이는데 전체적으로 Fig. 6(a)와 비슷한 침하경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 6(a)와 (b)에 표시되지 않은 나머지 케이슨들의 침하경향도 매우 유사하다.

Fig. 6(c)는 48개의 곡면슬리트케이슨중에서 No.22, 27, 31, 53 케이슨에 대한 침하량을 도시한 것이다. 곡면슬리트케이슨이 설치된 시점은 2004년 9월부터 2008년 1월까지이고 설치 후 계측기간은 길게는 약 2년 1개월에서 짧게는 약 85일로 케이슨에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 침하특성은 무공케이슨에서 나타난 것과 비슷하게 설치 이후 탄성침하로 판단되는 침하가 발생한 후

완만한 침하를 보이다 특정 시점에 급격한 침하가 발생한 것을 볼 수 있다.

Fig. 6(d)는 확폭슬리트케이슨중에서 No.20, 21, 32, 44에 대한 침하기록을 도시한 것이다. 확폭슬리트케이슨은 무공케이슨과 곡면슬리트케이슨의 연결부분과 48개 곡면 슬리트케이슨들사이에 설치되었다. 또한 확폭슬리트케이슨은 곡면슬리트케이슨과 이형곡면슬리트케이슨의 연결부위에도 설치하여 방파제 설치 시 발생할 수 있는 여러 가지 문제점을 고려한 케이슨이다. 침하특성은 앞의 다른 케이슨에서 발견된 것 같이 설치 이후 탄성침하로 판단되는 침하가 발생한 후 완만한 침하를 보이다 특정 시점에 급격한 침하가 발생하고 이후 다시 완만한 침하경향을 보인다.

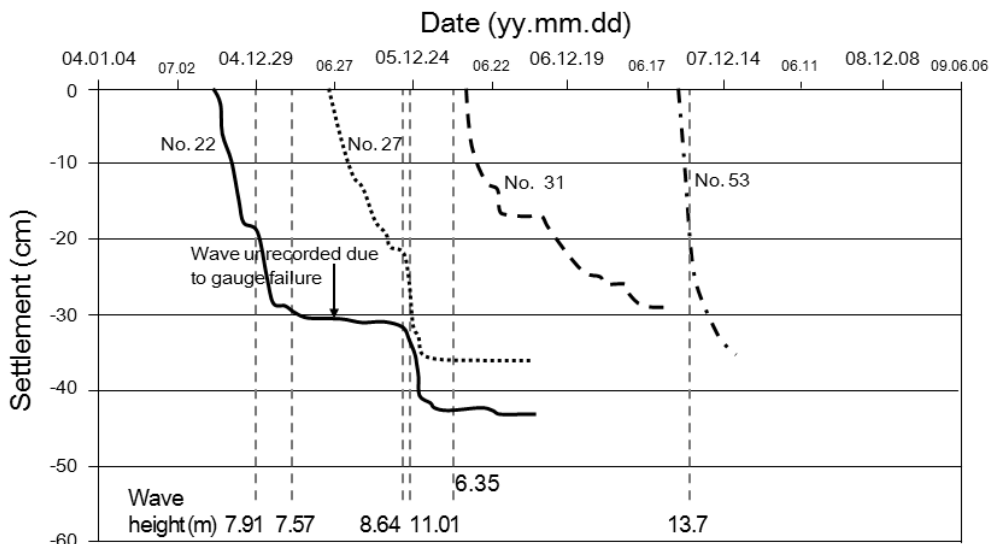


Fig. 6. (c) Settlement history of curved slit caissons of Nos. 22, 27, 31 and 53

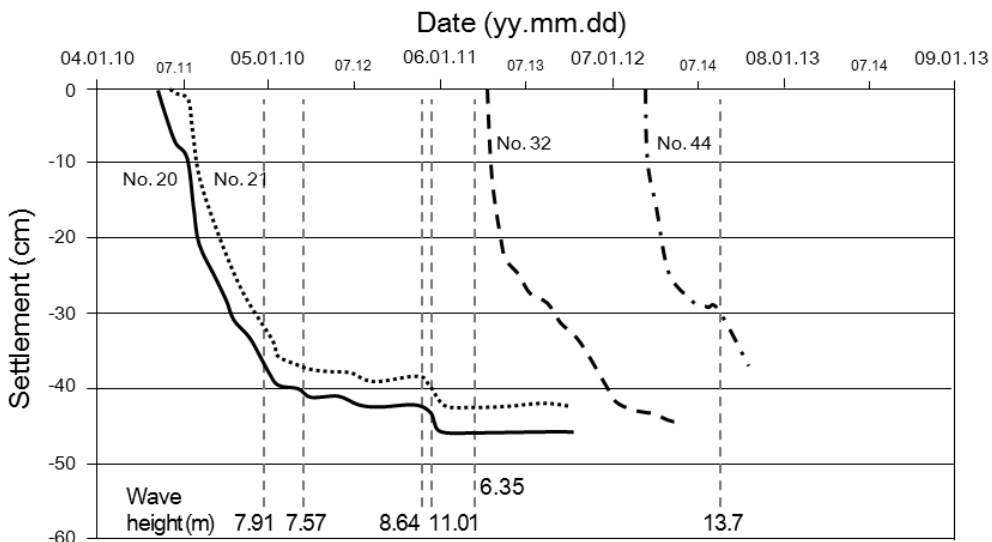


Fig. 6. (d) Settlement history of enlarged slit caissons of Nos. 20, 21, 32 and 44

방파제의 동쪽 단부에 형성되는 둥근 모양의 제체를 형성하기 위하여 6개의 이형곡면슬리트케이슨(No.79~No.84)에 대한 침하기록은 계측기간이 너무 짧아 침하와 파에 의한 영향을 고려할 만큼의 자료로는 활용할 수 없어 본 연구 범위에서 제외하였다.

4. 케이슨 침하 결과분석

4.1 파랑의 영향

케이슨 침하 계측결과 중 가장 계측기간이 긴 무공케이슨에 대한 결과를 보면 파랑과 케이슨 침하 관계를 쉽게 파악할 수 있다. Fig. 6(a)를 보면 케이슨의 침하는 최고 파고 11.38m를 기록한 태풍매미가 작용한 시점에 이전까지의 침하와는 다른 경향의 큰 침하가 나타난 것을 볼 수 있다. 이 부분이 파와 케이슨 침하와의 관계를 분명히 보여주는 부분이다. 태풍 매미 이후에는 5m 이상의 파고가 14회 발생하였지만(Table 1) 파에 의해서 발생한 침하라고 판단할 만한 특별한 징후가 없이 완만한 경사를 가지고 침하가 진행되는 것을 볼 수 있다. 그 이후에 태풍 매미와 비교해 작지만 11.01m의 파고가 발생한 2005년 12월 21일의 태풍경보(파고 11.01m) 전후로 케이슨에서 약간의 급격한 침하가 발생한 것을 볼 수 있다.

Fig. 6(b)는 태풍 매미 이후에 설치된 무공케이슨에 대한 침하기록으로 2004년 10월경부터 거치되기 시작한 케이슨은 2005년 1월경까지는 각각 침하량에 차이는 보이지만 지속적인 침하를 보이다가 2005년 3월 24일경에 7.57m 파고를 가진 파랑에 의해 급격한 침하가 발생하였다. 그리고 다시 완만한 경사를 보이다가 2005년 7월경에 급격한 침하를 보이는데 이 부분에 대한 파고의 자료는 설치된 파고계의 유실에 의해서 해양의 상태를 설명할 수는 없지만 파에 의한 침하라고 유추할 수 있는 침하가 발생하였음을 알 수 있다. 이후 완만한 침하 경향을 보이다 마지막으로 2005년 12월경에 급격한 침하가 발생하는데 한 달 동안에 파고가 8.64m, 11.01m 되는 파랑이 발생하였기 때문이다. Fig. 6(c)와 (d)에서도 비슷한 경향의 파랑-침하 관계를 볼 수 있다.

태풍 파랑과 관련 케이슨 침하 계측결과에서 나타난 침하특성을 요약하면 다음과 같이 두 가지로 정리할 수 있다: 1) 큰 태풍 파랑이 작용시 케이슨은 단시간에 큰 침하 경향을 보이고, 2) 이전의 파랑 보다 작거나 비슷

한 규모의 파랑이 케이슨에 작용시에는 침하가 거의 발생되지 않는다.

첫 번째 침하특성은 해저지반 특히 케이슨 하부 지반에 진동과잉간극수압과 잔류과잉간극수압에 의해 발생한 과잉간극수압에 의한 액상화(liquefaction) 발생 후 소산에 따른 결과이고, 두 번째 침하특성은 해저지반의 고밀도화(solidification or compaction)와 관련된다(Madsen, 1978; Sassa and Sekiguchi, 1999; Kudella et al., 2006; Sumer et al., 2006; Kirca et al., 2013). 다음 절에서 이 두 가지 특성에 대해 기존 해외연구 사례를 중심으로 좀 더 자세히 분석하고자 한다. 인용된 해외연구 사례는 대부분 모래 지반에서 수행된 실험으로 본 연구 대상 지역의 해성퇴적층이 세립 내지 중립의 모래(SP), 실트질 모래(SM)로 구성되어 있음을 감안하면 연구결과 분석에 이들 해외연구 사례를 인용해도 별 무리는 없을 것으로 판단된다.

4.2 케이슨 하부지반 액상화(liquefaction)

흙의 액상화는 일반적으로 흙이 유효응력을 상실하여 액체처럼 흙이 흐르는 상태를 일컫는다. 일반적으로 파랑에 의한 액상화는 지진하중에 의한 액상화와는 다른 메카니즘으로 발생된다. 대표적인 예인 태풍파랑의 경우 주기가 10s 내외인 반면 지진의 1s 내외 이다. 태풍파랑은 작용 기간은 수 시간에서 수일 되지만 지진하중은 몇 분이다. 그리고 파랑하중이 물이라는 매질을 통해 간접적으로 지반에 전달되는 반면 지진하중은 지반에 직접 발생되므로 더 큰 영역에서 액상화가 발생된다. 액상화 발생 메카니즘은 서로 다르지만 액상화 발생 후 지반의 유효응력 상실이라는 같은 결과를 초래한다(Seed and Rahman, 1978).

파랑에 의한 해저지반의 액상화는 연속적인 파랑하중이 지반에 작용하여 진동과잉간극수압(oscillatory excess pore pressure)과 잔류과잉간극수압(residual excess pore pressure)의 합인 과잉간극수압에 의해 발생된다. Fig. 7은 Sassa and Sekiguchi의 원심모형실험 결과로 과잉간극수압의 증가에 따른 해저지반의 액상화를 잘 보여준다. 해저지반의 액상화는 초기 유효응력(4.5kPa)이 작은 지반의 상부 표층($z=-10\text{mm}$)에서 약 1500ms에서 제일 먼저 발생한 후 하부지반의 점점 확대되는 경향을 보인다. 초기 유효응력이 38.6kPa인 $z=-91\text{mm}$ 에서는 약 5000ms에서 액상화가 발생된다.

방파제가 설치된 해저지반의 액상화 관련 Kudella et al.(2006)은 파고 $H=0.4\text{m}$, 주기 $T=6.5\text{s}$, 수심 $h_s=1.6\text{m}$ 조건에서 실시한 수조모형실험으로부터 재미있는 결과를

제시하였다(Fig. 8). 이 그림은 90s~100s 사이에서 발생한 진동과잉간극수압 분포이다. 사석마운드(P62: 파압 분포)와 그 하부 지반(P23, P41: 과잉간극수압)의 거동

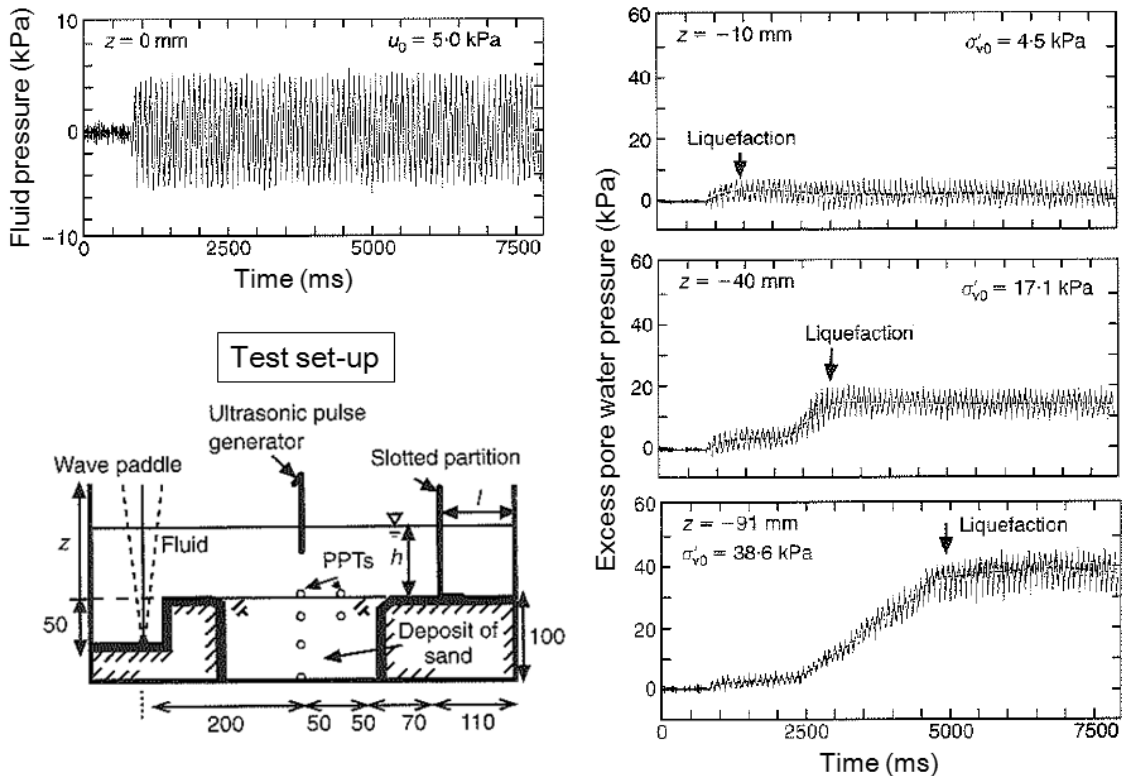


Fig. 7. Time histories of wave pressure (5.0 kPa) and excess pore water pressure with different depths (modified from Sassa and Sekiguchi, 1999)

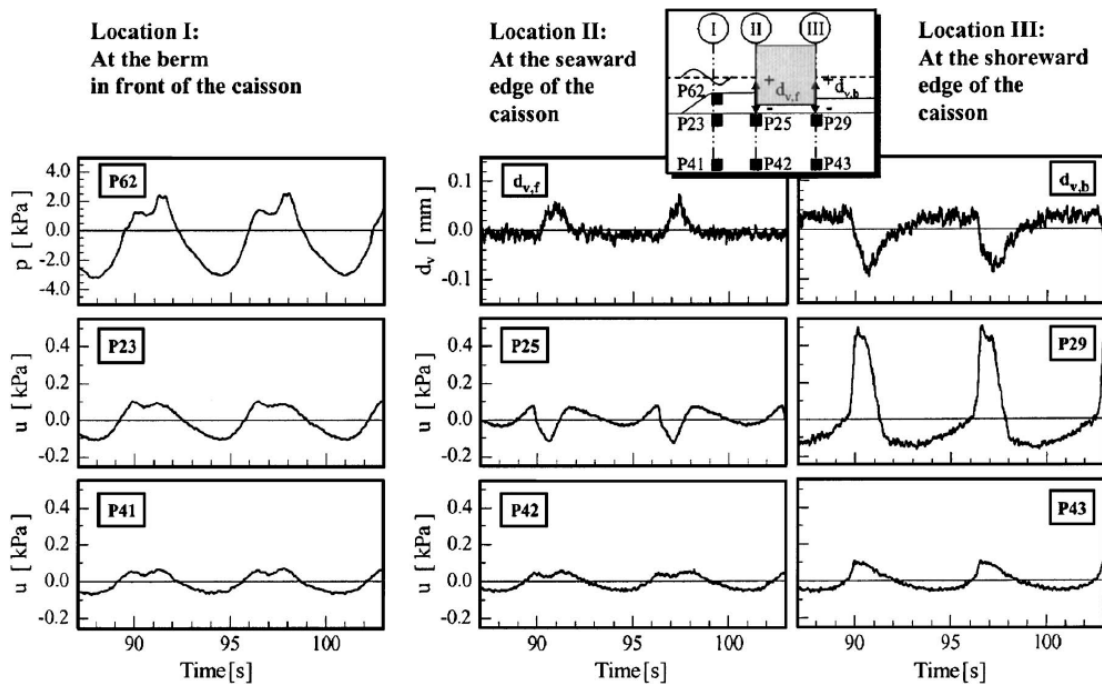


Fig. 8. Oscillatory excess pore pressure on the seabed for pulsating wave load with wave height $H=0.4\text{ m}$, wave period $T=6.5\text{ s}$, water depth $h_s=1.6\text{ m}$ (Kudella et al., 2006)

을 보면 파압이 해저지반의 과잉간극수압과 어떤 상관 관계가 있는지 알 수 있다. 해저지반은 파랑의 거동, 즉 파봉(crest) 및 파곡(trough)에 따라 지반의 진동과잉간극수압이 같이 변화되어 같은 거동을 보인다. 그리고 파동의 영향을 직접 받는 상부 해저지반(P23)이 하부 해저지반(P41) 보다 더 큰 변동을 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 케이슨 하부지반의 경우 파랑이 직접적으로 액상화를 유발하기 보다는 파랑에 의한 케이슨 구조물의 동적운동($d_{v,f}$, $d_{v,b}$)에 의해 하부해저지반에 진동과잉간극수압(P25, P29, P42, P43)이 발생되어 액상화가 발생된다. 케이슨이 상방향으로 거동하면 지반은 부의 진동과잉간극수압을 보이고, 케이슨이 하방향으로 거동하면 지반에서는 양의 진동과잉간극수압이 발생된다. 그리고 구조물의 동적영향을 직접 받는 상부 해저지반(P25, P29)이 하부 해저지반(P42, P43) 보다 더 큰 변동을 보인다. 또한 육지쪽 해저지반(P29, P43)이 바다쪽 해저지반(P25, P42)보다 더 큰 진동과잉간극수압 변화를 보여준다. 요약하면, 케이슨 주변의 해저지반은 파랑의 거동(파봉, 파곡)에 따라 지반의 진동과잉간극수압이 같이 변하는 반면, 케이슨 하부 지반의 진동과잉간극수압은 케이슨의 거동에 지배되는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 Kudella et al.(2006)이 파고 $H=0.6\text{m}$, 주기 $T=6.5\text{s}$, 수심 $h_s=1.6\text{m}$ 조건에서 실시한 수조모형실험으로부터 획득한 자료이다. 총 1000s 가량의 케이슨 하부

지반의 진동 및 잔류과잉간극수압의 변동을 케이슨 거동과 같이 도시한 것이다. 케이슨 하부 지반의 과잉간극수압(P36, 진동+잔류) 증가에 따라 케이슨 침하($d_{v,b}$)가 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 케이슨 하부지반의 과잉간극수압의 거동이 전적으로 케이슨 동적거동에 지배된다는 것을 분명하게 보여주는 결과이다.

4.3 고밀도화(solidification or compaction)

고밀도화는 해저지반에서 액상화를 유발시킨 과잉간극수압이 소산되면서 지반이 침하되며 다짐이 되는 것을 의미한다. 고밀도화 과정은 Sassa and Sekiguchi(1999), Sumer et al.(2004), Miyamoto et al.(2004) 등의 연구에서 밝혀진 사실로 토질역학에서 자중압밀과정과 유사한 현상이다. 자중압밀과 다른 점은 파랑이 작용하는 조건에서 액상화이후에 발생된다는 것이다.

Fig. 10은 파고 16cm 주기 1.6s 조건에서 실시된 수조 모형시험 결과이다(Sumer et al., 2006). 파랑에 의해 축적된 과잉간극수압은 하부지반에서 크고 표층 부분이 작아 압력경사가 형성된다. 이 압력경사로 인해 하부지반의 물이 해저지반 표층을 통해 빠져나가면서 과잉간극수압은 소산되고 입자간 접촉이 이루어지게 된다. 보통 과잉간극수압은 각 깊이별로 일정한 값을 유지하다가 압력이 큰 하층 지반부터 소산이 시작되어 시간이

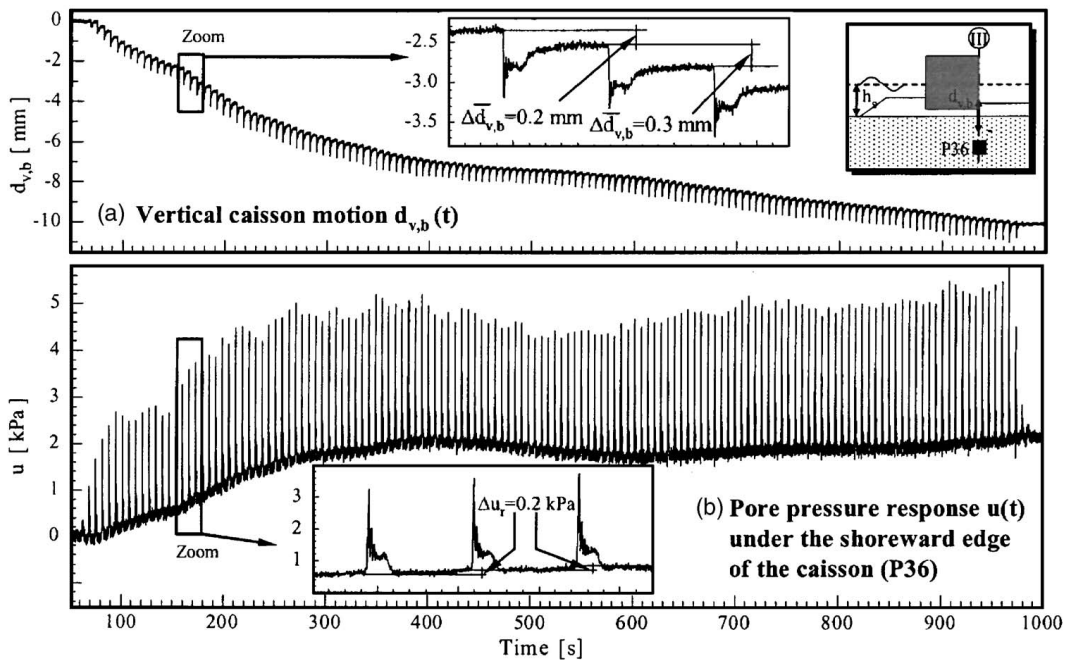


Fig. 9. Oscillatory and residual excess pore pressure generation induced by caisson motions induced by wave with wave height $H=0.6\text{m}$, wave period $T=6.5\text{ s}$, water depth $h_s=1.6\text{ m}$ (Kudella et al., 2006)

흐르면서 상부 지반층에서 확산된다. 그림에서 화살표는 깊이별 과잉간극수압이 소산되는 시점을 표시한 것으로 하부 지반부터 소산이 시작됨을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10의 깊이 12.5cm에서 시간에 따른 해저지반에서의 과잉간극수압변화를 개략적으로 다시 도시한 것이다. 이 그림에서 과잉간극수압의 발생과 소산되는 시점을 보다 분명하게 알 수 있다. 파랑이 작용함에 따라 과잉간극수압이 해저지반에 축적되기 시작하여 초기유효응력을 초과하는 시점에서 액상화가 발생된다. 그리고 이 액상화 상태는 어느 정도 유지된 후 과잉간극수압이 소산되기 시작하는데 그 때가 고밀도가 진행되는 시점이다. 파랑에 의한 해저지반의 액상화는

표층 지반에서 시작하여 하부 지반으로 확대되고 고밀도화는 그 반대로 진행되는 것이다.

고밀도화과정을 경험한 지반은 동급의 또는 그 보다 작은 파랑 조건에서는 액상화 발생 가능성이 현저하게 줄어들어 결과적으로 침하 발생도 감소된다. Fig. 6(a)를 보면 태풍매미(최대파고 11.38m) 이후 5m 이상의 파고가 14회 발생하였는데도 파에 의해서 발생한 침하라고 판단할 만한 큰 침하가 케이슨에서 발생되지 않은 것은 이와 같은 이유 때문이다. 고밀도화된 지반은 모래지반의 응력이력(stress history)과도 관련된다. 만약 모래퇴적지반이 이전에 재하 혹은 변형을 받은 바가 있으면 압축성은 상당히 감소한다. 따라서 침하가 상당히 줄어

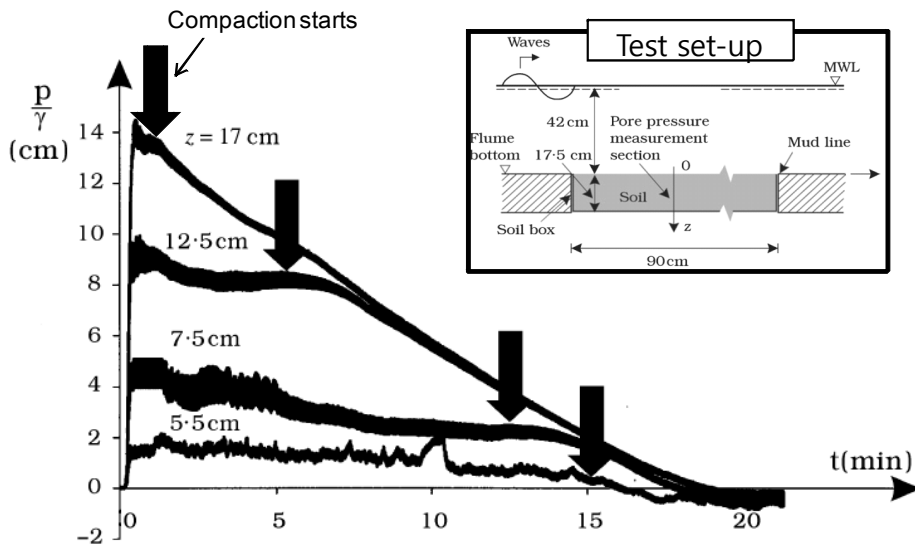


Fig. 10. Excess pore pressure build up and dissipation histories with different seabed depths(modified from Sumer et al., 2006)

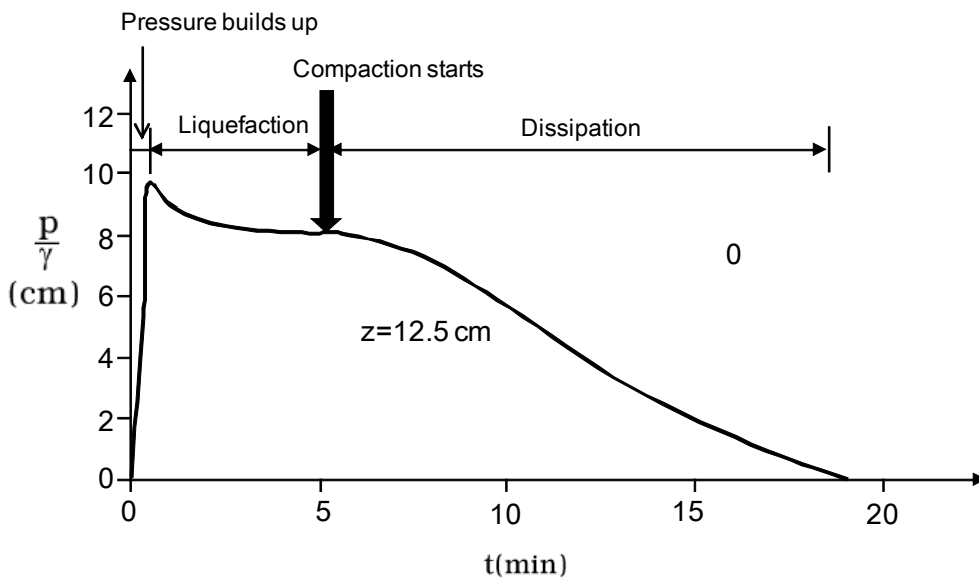


Fig. 11. Schematic diagram of time series of excess pore pressure at depth z=12.5 cm (modified from Sumer et al., 2006)

들게 된다. 모래의 삼축시험 시 하중을 감소시켰다가 다시 재하 한 경우 탄성계수 E_s 은 초기탄성계수 E_{s0} 보다 상당히 작은 것을 알 수 있다. 이는 곧 재하응력을 받은 지반은 압축성이 상당히 감소되었음을 나타내며 이러한 지반에서는 침하량이 상당히 감소할 것임을 알 수 있다.

5. 결론 및 제언

5.1 결론

장기간에 걸친 제주 외항 서방파제 케이슨 침하 계측 결과와 이 지역에서 동일시기에 발생한 파랑을 같이 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 유추하였다.

- (1) 케이슨 침하에 파랑의 영향이 분명하게 존재하는 것을 알 수 있다. 많은 케이슨 침하 계측결과 중에서 가장 계측기간이 긴 무공케이슨에 대한 결과를 보면 파랑과 케이슨 침하 관계를 쉽게 파악할 수 있다. 최고 파고 11.38m를 기록한 태풍매미가 작용한 시점에 케이슨 침하가 이전의 침하와는 다르게 크게 발생된 것을 알 수 있다. 이것은 태풍과 같은 고파랑이 발생하는 조건에서 케이슨 침하가 파랑의 영향을 받았음을 보여주는 증거이다. 케이슨 침하는 파랑으로 인한 케이슨 구조물의 동적운동에 의해 케이슨 하부지반에 발생된 과잉간극수압의 누적으로 인한 액상화와 축적된 과잉간극수압의 소산에 따른 지반의 고밀도화 과정을 통해 발생된 것으로 볼 수 있다.
- (2) 파랑에 의한 케이슨 침하는 파랑의 크기에 지배되고 지반의 응력이력과도 관련이 있다. 태풍과 같은 고파랑이 발생하는 조건에서는 분명하게 파랑이 케이슨 침하에 영향을 미친다. 하지만, 이전의 파랑 보다 작거나 비슷한 규모의 파랑이 케이슨에 작용시에는 케이슨 침하에 미치는 파랑의 영향은 미비한 것으로 나타났다. 태풍 매미 이후에는 5m 이상의 파고를 가진 파랑이 대상지역에 14회 발생하였지만 파에 의해서 발생한 침하라고 판단할 만한 특별한 징후가 없이 완만한 경사를 가지고 케이슨 침하가 진행되는 것을 알 수 있다. 이것은 고밀도화과정을 경험한 지반이 동급의 또는 그 보다 작은 파랑 조건에서는 액상화 발생 가능성이 현저하게 줄어들어 결

과적으로 침하 발생도 감소되었기 때문이다.

5.2 향후 연구 계획

본 연구는 파동으로 인한 해저지반 액상화를 실제 방파제 침하 계측 자료를 중심으로 검토하였다. 하지만 해안구조물에 미치는 파랑의 영향을 확인한 정성적인 연구의 한계를 가지고 있다. 이를 극복하기 위해 향후 수치해석을 통한 정량적인 연구를 수행하고자 한다. 계략적인 수치해석 방향은 다음과 같다.

본 논문의 서론에 언급된 지금까지 수행된 수치해석 연구는 해저지반의 동적거동을 대부분 규칙파를 대상으로 수행하였다. 하지만 실제 파동은 불규칙파동에 가깝다. 따라서 불규칙파동장 조건에서 해저면과 구조물에 작용하는 불규칙파압을 산정하여 해석에 적용하고자 한다. 또한 해저지반에 작용하는 유속도 산정하여 유속에 의해 발생된 전단응력도 같이 고려하고자 한다. 수치파동수로를 통해 산정된 결과는 지반의 동적거동을 정밀하게 재현할 수 있는 지반해석프로그램에 외력으로 입력하여 해저지반내에서 진동과잉간극수압, 잔류과잉간극수압, 유효응력, 액상화, 지반변형 및 방파제의 변위에 대한 불규칙파랑-해저지반-방파제의 상호작용 특성을 정량적으로 평가하고자 한다.

파랑으로 인한 해저지반액상화는 방파제를 포함한 해안구조물의 침하 혹은 전도 등을 야기하여 궁극적으로 구조물의 파괴와 같은 큰 피해를 초래할 수 있다. 우리나라의 경우 최근 2003년 태풍 매미의 내습시 남해안에 해안구조물의 침하에 따른 많은 피해와 2012년 태풍 볼라벤 내습시 제주도 서귀포항 방파제의 피해사례를 대표적으로 들 수 있다. 유사한 피해사례가 세계 각지에서 많이 발생되었는데 1978년에 포르투갈 Cape Sines에 있는 Sines방파제의 침하가 대표적인 예 이다. 향후 추가적인 수치해석 연구를 통해 해안구조물 설계에서 해저지반의 동적거동특성 반영을 어느 정도 어떻게 해야 할지 그 대안을 제시하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A1A2006169).

참고문헌 (References)

1. Biot, M.A. (1941), "General theory of Three-dimensional Consolidation", *Journal of Applied Physics*, Vol.12, pp.155-165.
2. Budhu, M. (2010), *Soil Mechanics and Foundations* - 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc.
3. Cho, S.-H. (2007), *A Study on the Characteristics of Cheju Island's Beach Sands*, Cheju National University, Master Thesis.
4. Hsu, J.R.C. and Jeng, D.S. (1994), "Wave-induced Soil Response in an Unsaturated Anisotropic Seabed of Finite Thickness", *Int. J. for Numerical Analytical Methods in Geomechanics*, 18(11), 785-807.
5. Kang, G.-C., Yun, S.-K., Kim, T.-H., and Kim, D. (2013), "Numerical Analysis on Settlement Behavior of Seabed Sand-Coastal Structure Subjected to Wave Loads", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.25, No.1, pp.20-27. (In Korean)
6. Kianoto, T. and Mase, H. (1999), "Boundary-layer Theory for Anisotropic Seabed Response to Sea Waves", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, Vol.125, No.4, pp.187-194.
7. Kim, T.-H., Nam, J.-M., Ge, L., and Lee, K.-I. (2008), "Settlement Characteristic of Beach Sands and Its Evaluation", *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol.26, No.2, pp.67-85.
8. Kirca, V. S. Ozgur, Sumer, B. Mutlu, and Fredsøe Jørgen (2013), Residual Liquefaction of Seabed under Standing Waves, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.139, No.6, pp.489-501.
9. Kudella, M. and Oumeraci, H. (2004a), *Wave-induced Pore Pressure in the Sandy Seabed underneath a Caisson Breakwater-Experimental Results of Large-Scale Model Tests*, Technical Rep., Technical Univ. of Braunschweig, Leichtweiss-Institute.
10. Kudella, M. and Oumeraci, H. (2004b), "Wave-induced Transient and Residual Pore Pressure in the Sand Bed underneath a Caisson Breakwater-Processes Leading to Liquefaction", *Proc., Int. Conf. on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*, Bochum, Germany, Balkema, Rotterdam, pp.411-424.
11. Kudella, M., Oumeraci, H., de Groot, M.B., and Meijers, P. (2006), "Large-Scale Experiments on Pore Pressure Generation underneath a Caisson Breakwater", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.132, No.4, pp.310-324.
12. Lee, K.-H., Baek, D.-J., Kim, D.-S., Kim, T.-H., and Bae, K.-S. (2014), Numerical Simulation on Seabed-Structure Dynamic Responses due to the Interaction between Waves, Seabed and Coastal Structure, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.26, No.1, pp.49-64. (In Korean)
13. Li, J. and Jeng, D.S. (2008), "Response of a Porous Seabed Around Breakwater Heads", *Ocean Eng.*, Vol.35, pp.864-886.
14. Madsen, O.S. (1978), "Wave-induced Pore Pressure and Effective Stresses in a Porous Bed", *Geotechnique*, Vol.28, pp.377-393.
15. Mase, H., Sakai, T., and Sakamoto, M. (1994), "Wave-induced Porewater Pressures and Effective Stresses around Breakwater", *Ocean Eng.*, Vol.21, No.4, pp.361-379.
16. Mei, C.C. and Foda, M.A. (1981), Wave-induced Response in a Fluid-filled Poroelastic Solid with a Free Surface - A Boundary Layer Theory", *Geophysical Journal of the Royal Astrological Society*, Vol.66, pp.597-631.
17. Miyamoto, J., Sassa, S., and Sekiguchi, H. (2004), "Progressive Solidification of a Liquefied Sand Layer during Continued Wave Loading", *Geotechnique*, Vol.54, No.10, pp.617-629.
18. Okusa, S. (1985), "Wave-induced Stresses in Unsaturated Submarine Sediments", *Geotechnique*, Vol.32, No.3, pp.235-247.
19. Sassa, S. and Sekiguchi, H. (1999), "Analysis of Wave-induced Liquefaction of Beds of Sand in Centrifuge", *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.621-638.
20. Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2001), "Analysis of Wave-induced Liquefaction of Sand Beds", *Geotechnique*, Vol.51, No.12, pp.115-126.
21. Sassa, S., Sekiguchi, H., and Miyamoto, J. (2001), "Analysis of Progressive Liquefaction as a Moving-boundary Problem", *Geotechnique*, Vol.51, No.10, 847-857.
22. Seed, H.B. and Rahman, M.S. (1978), "Wave-induced Pore Pressure in Relation to Ocean Floor Stability of Cohesionless Soil", *Marine Geotechnology*, Vol.3, No.2, pp.123-150.
23. Sekiguchi, H., Kita, K., and Okamoto, O. (1995), "Response of Pore-elastoplastic Beds to Standing Waves", *Soils and Foundations*, Vol.35, No.3, pp.31-42.
24. Sumer, B.M. and Fredsøe, J. (2002), *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*, World Scientific, 536pp.
25. Sumer, B.M., Hatipoglu, F., and Fredsøe, J. (2004), "The Cycle of Soil Behaviour during Wave Liquefaction", Book of Abstracts, Paper 171, *29th International Conference on Coastal Engineering*, 19-4.September, 2004, National Civil Engineering Laboratory (LNEC), Lisbon, Portugal.
26. Sumer, B.M., Hatipoglu, F., Fredsøe, J., and Sumer, S.K. (2006), "The Sequence of Sediment Behaviour during Wave-induced Liquefaction", *Sedimentology*, Vol.53, pp.611-629.
27. Ulker, M.B.C., Rahman, M.S., and Guddati, M.N. (2010), "Wave-induced Dynamic Response and Instability of Seabed around Caisson Breakwater", *Ocean Eng.*, Vol.37, pp.1522-1545.
28. Yamamoto, T., Koning, H., Sillmeijer, H., and Van Hijum, E. (1978), "On the Response of a Poroelastic Bed to Water Waves", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.87, pp.193-206.
29. Ye, J., Jeng, D., Liu, P.L.-F., Chan, A.H.C, Ren, W., and Changqi, Z. (2014), "Breaking Wave-induced Response of Composite Breakwater and Liquefaction in Seabed Foundation", *Coastal Eng.*, Vol.85, pp.72-86.
30. Yuhi, M. and Ishida, H. (2002), "Simplified Solution of Wave-induced Seabed Response in Anisotropic Seabed", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, Vol.128, No.1, pp.46-50.
31. Zen, K. and Yamazaki, H. (1990a), "Mechanism of Wave-induced Liquefaction and Densification in Seabed", *Soils and Foundations*, Vol.30, pp.90-104.
32. Zen, K. and Yamazaki, H. (1990b), "Oscillatory Pore Pressure and Liquefaction in Seabed Induced by Ocean Waves", *Soils and Foundations*, Vol.30, pp.147-161.

Received : April 6th, 2014

Revised : May 28th, 2014

Accepted : July 2nd, 2014