

파랑작용에 의한 해저지반의 거동에 관한 수치해석적 연구

Numerical study on the behavior of seabed under wave-load

윤성규*·윤종익**·이영준*·김종성***·최성준***·김태형****

Yun, Seong-Kyu · Yun, Jong-Lik · Kim, Jong-Seong · Choi, Seong-Jun · Kim, Tae-Hyung

요약

에너지자원(석유, 천연가스, 전기) 이송과 정보전달(해저광케이블)을 위한 다양한 형태의 해저 매설관이 해저면에 설치되어 운영이 되고 있다. 이들 매설관은 지진 또는 해저사면의 유실과 같은 자연재해로 인해 파괴되는 일들이 빈번하게 발생되고 있다. 그 외 태풍 등에 의해 발생하는 파랑하중에 의해서도 이들 매설관이 종종 파괴되는 일이 발생되기도 한다. 태풍 등에 의한 파랑하중은 해저지반에 과도한 과잉간극수압을 발생시켜 지반 액상화를 유발 세굴을 발생시키는데 이로 인해 매설관 하부에는 과도한 인장응력이 유발되어 매설관의 파괴 문제가 야기된다. 만약 석유수송 해저매설관이 파괴되면 경제적·산업적 측면에서 직접적인 피해 이외에도 해양환경에 미치는 영향은 매우 크다고 볼 수 있다. 따라서 파랑하중에 의한 해저매설관 주변 지반의 거동 분석 및 안정성 평가에 관한 연구가 요구된다.

keywords : 파 · 해저파이프라인 · 지반, 파랑하중, 액상화

1. 서론

해저파이프라인은 석유, 천연가스, 상하수 등의 유체를 수송하는 역할을 포함하여, 해저 광케이블을 통한 정보의 전달수단으로서도 그 중요성이 증대되는 구조물이다. 해저파이프라인은 기본적으로 육상의 파이프라인과 같은 방법으로 설계·시공되지만 육상의 파이프라인에 비해 파력·조류력과 같은 열악한 해양환경에 노출되므로 부설 및 가동시 손상을 입을 가능성이 있고, 해저파이프라인 주변지반의 세굴 및 액상화와 같은 2차적인 요인으로 으로 인하여 부상, 좌굴 및 파단에 이르는 위험성이 있다. 특히, 석유수송 파이프라인의 경우에는 사고로 인한 직접적인 피해 이외에도 해양환경에 미치는 악영향은 매우 크다. 따라서, 해저파이프라인의 안정성을 유지하기 위하여 이러한 불안정한 요소들에 대한 충분한 검토가 수행되어야 한다.

2. 수치해석 조건

2.1. 관련 조건

* 한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 tjdrb30@nate.com, angchun@nate.com

** 초석건설산업(주) 상무 ikyoon@hanmail.net

*** 한국해양대학교 학부 토목공학과 misterkei@nate.com, choil2322632@hanmail.net

**** 한국해양대학교 교수 토목공학과 kth67399@hhu.ac.kr

본 연구에서 사용된 파랑조건은 표 1, 해저파이프라인의 조건은 표 2, 해저지반의 조건은 표 3 와 같다. 파랑은 규칙파를 사용하였다..

표 1. 파랑조건

파고 (m)	주기 (s)	수심 (m)	조파시간 (s)	해저지반 (m)
1	4	10	100	10

표 2. 해저파이프라인 조건

	밀도 (t/m ³)	직경 (m)	관두께 (m)	재질	탄성계수 (t/m ²)	포아손 비
pipe	7.84	2	0.1	강관	21000000	0.29

표 3. 해저지반 조건

	e 간극비	n 간극률	C _d 항력계수	C _m 관성계수	k 투수계수 (cm/s)	E 탄성계수 (KN/m ²)	ρ 포아손비	γ _{sat} 포화단위중량 (t/m ³)
중간모래	0.67	0.40	0.45	0.15	0.001	30000	0.30	1.96
중간실트	0.43	0.30	0.30	0.0	0.0001	-	0.30	2.05
중간점토	0.25	0.20	0.20	0.0	0.00001	7000	0.40	2.28

2.2. 프로그램

파랑작용에 의한 간극수압을 측정하기 위해 CADMAS-SURF 2차원 수치과동수조를 사용 하였다.

2.2.1 CADMAS-SURF의 개요

비압축성의 점성유체에 대한 자유수면을 효과적으로 수치모의 할 수 있는 VOF(Volume of fluid) 법이 제안된 이후, 이를 활용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, VOF법은 해안공학분야에서 수리실험에 의존 하였던 쇄파과정 및 쇄파후의 파랑변형특성을 수치적으로 재현할 수 있어 최근 들어서 VOF법을 활용한 수치모델의 개발이 다양하게 시도되고 있다. 단, VOF법은 자유수면을 모의하는 기법이므로 해안공학분야에 적용시 파랑의 전달과 반사를 정확하게 모의할 수 있는 효과적인 경계조건과 주기적인 파동장의 형성을 위한 조파방법이 필요하다. 이러한 경계조건과 조파방법을 VOF법과 결부시켜 해안·항만구조물에 의한 쇄파시의 파랑거동특성 등에 활용한 수치과동수로의 연구개발이 최근 활발하게 이루어지고 있으며(沿岸開發技術研究センター, 2001; van der Meer et al., 1992; Troch, 1997), 그 중에 항만구조물의 내과설계를 목적으로 일본연안개발기술연구센터(2001)에서 개발한 수치과동수로인 CADMAS-SURF는 실무에서 활발히 활용되고 있으며, 사용자가 직접 입·출력을 제어할 수 있는 효과적인 2차원파동장의 해석프로그램으로 알려져 있다

CADMAS-SURF에서 적용하는 수치과동수로는 2차원수치과동수로내의 파의 재반사를 방지하기 위한 경계처리기법으로 해석영역의 양쪽에 부가감쇠영역을 두고, 해석영역내에 조파를 위한 조파소스를 적용하고 있다. 유체를 2차원비압축성의 점성유체로 가정하면 기초방정식은 연속방정식과 porous media로 확장한 Navier-Stokes의 운동방정식으로 구성된다.(Fujima, 2002).

2.3. 파랑작용에 의한 지반내의 간극수압

간극수압 측정위치는 그림 1과 같이 각 case별로 매설관 아래 세 지점에서 해저지반 최저점에서부터 해저지반 최고점에 이르기까지 1m 간격으로 간극수압을 측정하였다.

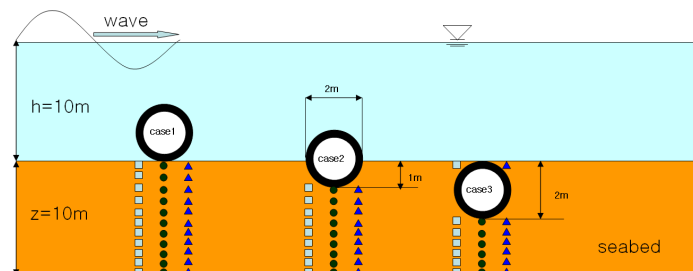


그림 1. 간극수압 측정 위치

2.4. 액상화 현상

2.4.1. 파랑 작용에 의한 액상화 현상

그림 2. 파랑에 의한 해저지반 액상화의 메카니즘을 나타낸 그림이다. 파랑이 통과할 때 해저지반 표면에서는 수위변화에 따른 수압변동이 발생한다. 이 변동이 그대로 지중의 간극수압변동 되면 지반의 유효응력은 변화되지, 액상화도 발생하지 않는다. 그러나, 지반 중에서 간극수압이 변동되기 위해서는 물의 이동이 필요한데, 지반 내의 작은 간극속에서 물의 이동은 순간적으로 발생하지 않으므로 해저표면의 간극수압변화와 지반 내의 간극수압변화 사이에 위상차가 발생한다. 파랑의 통과에 따른 해저지반표면에서 수압의 변동량을 u_w , 지반 내의 간극수압의 변동량을 u_m 으로 한다면 지반의 유효 응력 σ'_v 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma'_v = \sigma'_{vo} + (u_w - u_m) \quad (1.1)$$

여기서 σ'_{vo} 는 파랑전 초기 유효응력이다. 파봉부분이 통과할 때 ($u_w = h_H f/w, u_m = u_{mH}$)에는 $u_w - u_m \geq 0$ 이지만 파곡 부분이 통과할 때 ($u_w = -h_H f/w, u_m = -u_{mH}$)에는 $u_w - u_m < 0$ 으로 되기 때문에 σ'_{vo} 가 적은 해저 지표면의 부근에서는 σ'_v 가 0으로 되는 경우 액상화 현상이 발생한다.

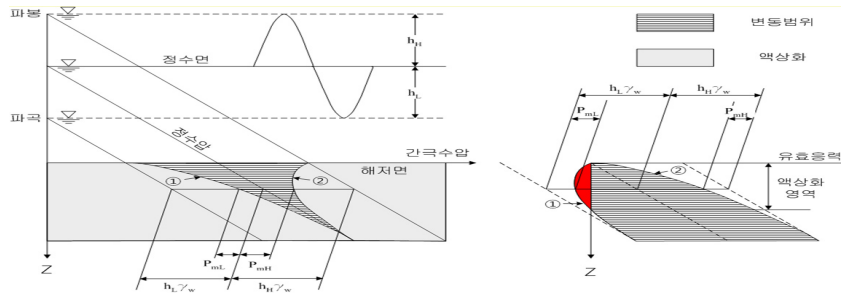


그림 2. 파랑에 의한 해저지반 액상화의 메카니즘

3. 해석결과

3.1. 파랑작용에 의한 지반내의 간극수압

그림 3.은 각 case별 표시된 모양의 위치별 간극수압을 시간에 따라 측정한 값으로 간극 수압의 값은 각 case별로 그림 3, 4에서처럼 해저지반 최저점에서 최소값을 해저지반 최고점에서 최대값을 나타내는 같은 양상의 그림이 그려졌다.

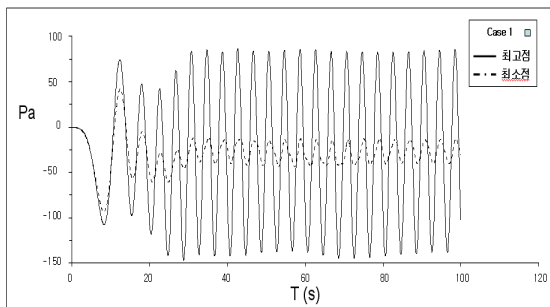


그림 3. case별 간극수압

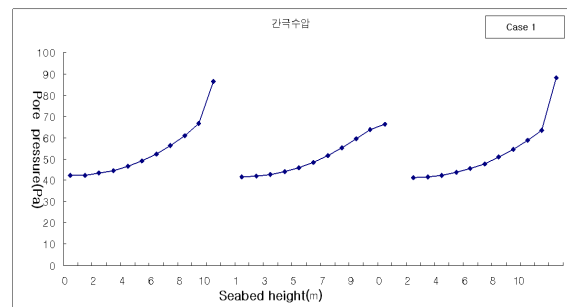


그림 4.각 지점별 최대값 그래프의 간극수압

3.1. 파랑작용에 의한 액상화 현상

식(1.1)을 통해 유효응력을 구하게 되면, 유효응력이 0과 같거나 작은 액상화 현상이 일어나는 구간은 표 4.를 통해 알 수 있다.

표 4. case별 액상화 발생 위치

	z (m)	$\alpha_v (t/m^2)$ case x-1	$\alpha_v (t/m_2)$ case x-2	$\alpha_v (t/m2)$ case x-3
case1	0	-0.4975346	-0.5000397	0.0026051
	-0.5	-0.0314687	-0.0331292	0.4690473
	-0.75	0.1759357	0.2003260	0.7022685
	-1	0.4345972	0.4337812	0.9354896
	-2	1.3680264	1.3677816	1.8699184
case2	0	*	*	*
	-1	0.9349592	0.9336740	0.9363056
	-2	1.8701224	1.8698776	1.8699592
case3	0.1	-0.0002326	*	0.0159344
	-1	*	*	*
	-2	1.8701224	1.8698368	1.8700000

4. 결론

- 1) 파랑에 의한 해저지반의 간극수압은 해저지반으로 깊어질수록 비선형으로 작아지며 해저지반 최저점에서 최소값을 나타내며 최고점에서 최대값을 나타낸다.
 - 2) 해저 매설관이 지반 위에 위치한 case 1에서는 case 1-1, case 1-2지점 해저지반아래 0.5m지점까지 액상화 현상이 나타났으며 case 1-3에서는 지반내의 물의 흐름이 매설관 아래 부분을 타고 상향하는 간극수압보다 매설관 위를 타고 내려오는 간극수압의 크기가 상대적으로 더 크기 때문에 액상화 현상이 발생하지 않았다.
 - 3) Case 2에서는 액상화 현상이 나타나지 않았다. 그 이유는 case 1에서 액상화 현상 발생 시점이 0.5m인데, case 2에서는 매설관이 해저지반 아래 1m까지 매설되어있기 때문에 액상화가 발생하지 않았다.
 - 4) Case 3에서는 case 3-1에서 해저지반 표면에서 0.1m부근까지 액상화 현상이 나타났다. case 3-3에서 액상화가 발생하지 않는 이유는 case 1-3과 같다
- 표 4의 *는 간극수압계 설치위치와 매설관의 위치가 겹쳐 간극수압이 측정되지 않았다. 추후 간극수압계의 위치를 조절해서 해석을 할 필요가 있다.

5. 향후 과제

발생된 액상화 현상에 따른 매설관 주위의 지반의 거동을 분석하여 해저매설관의 적합한 매설방법을 제시할 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

김창훈 (2007) 파랑작용에 의한 해저파이프라인 주변지반의 응답 특성, **한국해양공학회 학회지**, 제21권 1호, pp.31~39.

Bear, J. (1972) Dynamics of Fluids in porous Media, 2th ed., American Elsevier, New York.

Bot, M.A. (1941) "General Theory of Three Dimensional Consolidation", J. appl, Phys., Vol 12, p155-164

Cevik, E. and Yuksel, Y. (1999) "Scour under submarine pipeline in waves in shoaling conditions". J Water. Port Coast Ocean Eng., Vol 117, No. 2 pp120-135