韓國海岸·海洋工學論文集 (2001)
第12券, pp. 69-78

횡하중을 받는 연약지반 방파제의 거동
Behaviors of Laterally Loaded Breakwater on Soft Ground

권오순[1] · 장인성[1] · 박우선[1] · 염기대[1]
O-Soon Kwon[1], In-Sung Jang[1], Woo-Sun Park[1], and Ki-Dai Yum[1]

1. 서 론

현재 국내에서 건설되고 있거나 계획 중인 신항만의 입지는 대부분 연약지반이며, 이로 인해 항만 건설 공사에서 많은 시간과 비용이 지반개량에 소요되고 있다. 항내 정온역 확보를 위해 시공되는 방파제의 경우에도 연약지반에서 발생하는 과도한 압밀 침하를 억제하기 위해 많은 비용을 투입하여 지반 개량을 실시하고 있다. 이러한 현실을 감안하여 방파제의 자중을 감소시켜 과도한 압밀 침하는 억제하면서 설계 파력에 저항할 수 있는 새로운 형식의 방파제가 개발되었다(門司剛至 등, 1989; 권오순 등, 2001).

이번 연구는 연약지반에서 적용할 수 있는 방파제를 제안하고, 수치해석을 실시하여 지반 조건과 다양한 방파제 설계 단면에 따른 방파제의 거동을 평가하고자 하였다. 본 논문에서는 지반조건과 방파제 단면에 따른 압밀 침하 거동과 함께 방파제 설계에서 가장 중요한 요건이 되는 횡방향 하중에 대한 방파제의 거동 특성을 고찰하여 효율적이고 경제적인 최적 방파제 단면 결정 방법을 제안하였다.

2. 연약지반 방파제

2.1 개요

본 연구에서 대상으로 한 연약지반용 방파제의 개념도는 그림 1과 같다. 일본에서 사용된 기존의 연약지반 방파제와 차이점은 전면 지반의 세굴을 방지하기 위해 저판이 지반 속으로 근입된 것과 지지력 확보를 위해 설치된 선단 지지 말뚝을 매우 연약한 지반에서도 사용할 수 있도록 하기 위해 수동토압으로 저항력을 발휘하는 지중벽 형식을 도입한 것이다. 또한, 기초부 내에 부력통을 설치하여 방파제 자중을 줄여 과도한 압밀 침하를 억제하고자 하였다.

2.2 압밀 침하량 산정

일반적으로 지반의 압밀 침하는 Terzaghi(1943)의 1차원 압밀 이론을 근거로 계산된다. 그러나, 실제 현상들이 2 차원 또는 3 차원 문제이며, Skempton and Bjerrum(1957)은 간극수압계수 A 를 이용하여 1 차원 압밀 침하량을 수정하여 2 차원효과를 고려한 바 있다.

연약지반 위에 놓인 방파제로 인해 발생하는 압밀

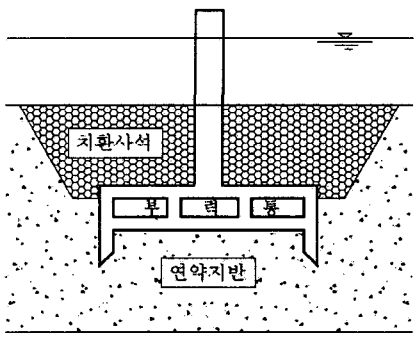


그림 1 연약지반 방파제 개념도

[1] 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 (Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-600, Korea)

침하를 고찰하기 위한 연구는 한계 상태 토질역학(Schofield and Wroth, 1968)에 의거한 modified Cam-Clay model 과 Biot(1941)의 압밀 이론을 적용한 평면변형률 조건에서의 유한요소해석을 활용하여 이루어지고 있다(Brugger et al, 1998). 그러나, 실제 설계에서는 이와 같은 유한요소해석을 수행하기에는 다소 어려움이 있으며, 대부분 1 차원 압밀 이론에 의한 압밀 침하량 산정이 이루어진다. 압밀 침하량 산정의 정확도를 높이기 위해 방파제 자중으로 인한 지반의 연직 응력 증분을 Boussinesq(1885)의 탄성해를 이용하여 추정하고, 산출된 응력 증분을 이용하여 1 차원 압밀 침하량을 산정하고 있다.

2.3 횡하중을 받는 방파제의 거동

일반적으로 연약지반 위에 놓인 방파제의 활동 저항력은 점성토 지반의 점착력과 방파제 저면의 면적의 곱으로 계산된다. 그러나 파압과 같이 편심 경사하중이 가해지면 부착력을 발휘하는 저면 면적을 산정하는데 있어 여러 가지 불확정 요소가 있기 때문에 시험에 의해 확정하는 것이 바람직하다.

편심 경사하중에 대한 저면 면적의 산정 방법으로는 Meyerhof(1953)의 방법을 적용할 수 있는데 일반적으로 이는 안전측으로 평가되고 있다. 말뚝이 설치된 기초의 활동저항력을 고찰하기 위해 실시된 수평재하시험을 실시하여 말뚝과 기초 저면의 하중부담률에 대한 연구(運輸省港灣技術研究所, 1963)도 이루어진 바 있으며, 그 결과 재하 초기에는 저면 부착력이 주로 발휘되지만 하중이 증가함에 따라 말뚝의 하중 분담률이 증가하는 것으로 알려졌다.

연약지반 방파제의 횡방향 지지력에 대한 연구로는 실내 모형을 이용한 토조시험 및 수치해석을 통해 방파제 기초의 근입깊이와 저판 폭 그리고 지중벽의 길이에 따른 횡방향 지지력 특성을 고찰한 바 있다(권오순 등, 2001). 연구 결과에 의하면, 방파제 기초의 근입깊이는 방파제의 횡방향 지지력에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났으며, 지중벽의 길이는 방파제 저판 폭에 비해 지지력 증대 효과가 대략 2 배 정도인 것으로 나타났다.

3. 수치 해석

3.1 개요

연약지반 방파제의 횡방향 지지 거동을 고찰하기 위하여 지반 조건, 설계파 그리고 기초의 저판 폭과 지중벽의 길이 및 기초 근입깊이에 따른 방파제의 횡방향 지지 거동을 평가하였다. 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(1999)를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 그림 2는 해석에 사용된 대표적인 해석 요소망이다. 해석은 평면변형률 조건에서 등방 경화

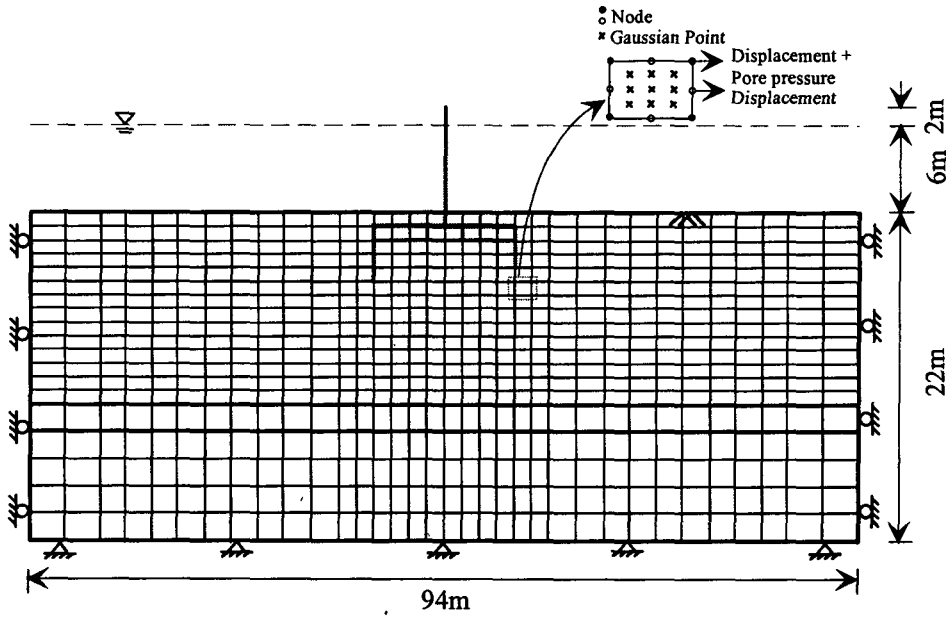


그림 2 해석에 사용된 요소망 (기본형)

모델인 modified Cam-Clay model을 적용하여 지반의 압밀 거동을 모사하였다. 방파제는 탄성의 콘크리트 보 요소로 모사하였고, 부력통에 해당하는 요소에서는 부력을 유발하기 위해 부(-)의 체적력을 적용하였다. 하중 재하 시점은 압밀이 발생하기 전과 압밀이 완료된 이후 시점에서 각각 재하한 결과, 압밀 발생 이전 시점이 더 위험한 것으로 나타나 시공 직후로 결정하였다.

3.2 해석조건

기본 조건은 수심 6m, 주기(T) 3.5초, 설계파고(H_{max}) 2.0m, 지표에서부터 방파제의 천단까지의 거리(H)는 8m이며 연약지반의 두께는 12m, 자중 저감을 위한 부력통의 두께는 0.5m로 적용하였다.

지반 조건은 매우 연약한 지반(case I)과 약간 연약한 지반(case II) 및 보통 굳기의 연약지반(case III)에 대해 해석을 수행하였다. 표 1은 3가지 지반의 물성치를 나타낸 것으로 현재 항만이 건설되고 있거나 계획 중인 현장의 지질조사보고서를 참고로 하였다.

연약지반의 두께가 어떤 영향을 미치는지에 대해 고찰하기 위해 case II 지반 조건에서 연약층의 두께를 바꾸어 해석을 수행하였다. 또한, 방파제 자중으로 인해 지반의 연직 응력이 증가되는 경향을 살펴보기 위해 부력통의 크기에 따른 해석도 수행하였다. 횡방향 하중의 크기에 따른 영향을 고찰하기 위해 설계파의 최대 파고(H_{max})를 4가지 조건으로 적용하여 비교하였다. 그리고, 방파제의 기초가 근입된 깊이(D_e)가 방파제의 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 case II 지반 조건에서 근입깊이를 바꾸어가며 해석을 실시하였으며, 연약지반 방파제의 기초 저판 폭과 지중벽이 얼마나 저항력을 발휘하는지 고찰하기 위해 3개 지반 조건에서 저판 폭(B)과 지중벽의 길이(D)를 바꾸어가며 해석을 실시하였다. 표 2는 해석조건을 정리한 것이다.

본 연구에서는 결과 분석의 편의를 위해 방파제 단면의 크기는 지표에서 방파제 천단까지의 거리(H)를 기준으로 정규화하여 사용하였다.

표 1 해석에 사용된 지반조건

구 분	γ_t (t/m^3)	e_0	λ	κ	ϕ	M	ν'	K_0
Case I	1.5	1.0	0.52	0.058	25.4	1.0	0.3	0.5
Case II	1.5	1.0	0.37	0.040	25.4	1.0	0.3	0.5
Case III	1.5	1.0	0.13	0.002	25.4	1.0	0.3	0.5

표 2 해석조건 (H=8.0m)

층후	최대파고 (H_{max}, m)	부력통 두께 (m)	근입깊이 (D_e)	저판폭 (B)	지중벽길이 (D)
1.0H	1.5m	0.00m	0.0m	1.50H	0.00H
1.5H	2.0m	0.25m	1.0m	2.00H	0.25H
2.0H	2.5m	0.50m	2.0m	2.50H	0.50H
2.5H	3.0m	0.75m	3.0m	3.00H	1.00H
3.0H		1.00m		3.75H	

4. 해석결과

4.1 연약지반의 두께에 따른 거동 특성

연약지반에서 발생하는 압밀 침하는 방파제의 자중으로 인해 지중 응력이 증가하기 때문이다. 지중 응력의 증가량은 심도가 깊어질 수록 급격하게 감소하는데, 이로 인해 연약층의 두께가 어느 정도 이상이 되면 압밀 침하는 특정한 값으로 수렴하게 된다.

방파제 하중으로 인해 증가된 지중의 응력을 고찰하기 위해 지중벽이 설치되지 않은 방파제에 대하여 수치해석을 실시하였다. 그림 3은 방파제 중앙 아래의 지반에서 발생하는 연직 응력 증분을 도시한 것으로, 기초와의 거리가 멀어지면서 급격하게 감소하다가 심도 20m 정도의 거리에서 응력 증분이 거의 0에 가까워 진다. 이것은 기초 폭(B)과 거의 같은 값이다.

이 결과는 Boussinesq(1885)의 탄성해를 이용하여 산정한 응력 증분식에서 기초 폭의 3배 깊이에서 하중의 20% 정도가 전달되는 것과는 차이가 있는데, 이것은 소성 거동을 하는 지반에서 응력의 전달이 탄성체 지반에서 보다 작기 때문으로 판단된다. 그림에서 case I 조건보다 상대적으로 더 단단한 지반인 case III 조건에서 하중이 더 깊은 심도까지 전달되는 것도 같은 맥락에서 설명할 수 있다.

이와 같은 결과를 토대로 본 연구에서 제안한 방파제의 압밀 침하는 지반조건에 따라 다소 차이가 있지만 압밀층의 두께가 기초 폭 정도에서 특정한 값에 수렴할 것으로 예측할 수 있으며, 연약지반 두께에 따른 수치해석 결과를 나타낸 그림 4에서 그것을 확인할 수 있다.

연약지반 방파제의 횡방향 지지력을 분석하기 위해 방파제 천단에서 발생하는 최대 횡방향 변위를 비교하였다. 발생 변위가 직접적으로 횡방향 지지력과 동일한 의미는 아니지만, 지반조건이 동일한 경우라면 횡방향 최대 변위를 횡방향 지지력과 동일한 개념으로 사용할 수 있다고 보고 분석을 하였다.

그림 5는 연약지반의 두께에 따른 방파제 천단에서 발생하는 횡방향 최대 변위를 도시한 것이다. 연약지반의 두께가 1.0H에서 2.0H로 증가할 때에는 횡방향 최대 변위가 다소 증가하지만, 그 이상에서는 거의 일정한 변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 방파제에 작용하는 설계 파력으로 인해 지반이 영향을 에 받는 심도가 2.0H 정도 라는 것을 의미한다.

또한, 이러한 결과는 연약지반 개량을 실시한 후 방파제를 시공하는 경우나 지지력을 확보할 수 있는 토

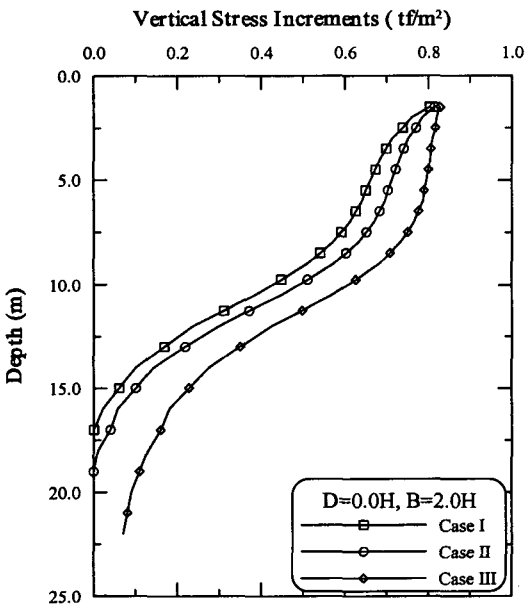


그림 3 방파제 자중에 의한 지중 응력

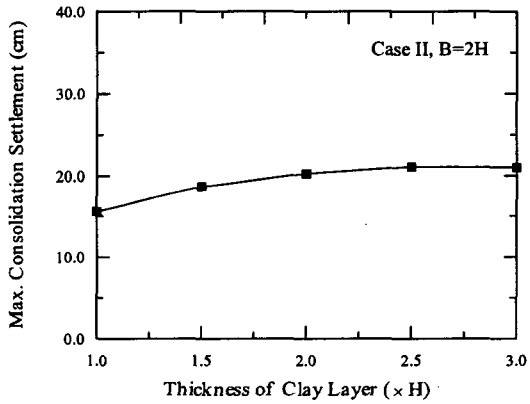


그림 4. 토층의 두께에 따른 최대 압밀 침하

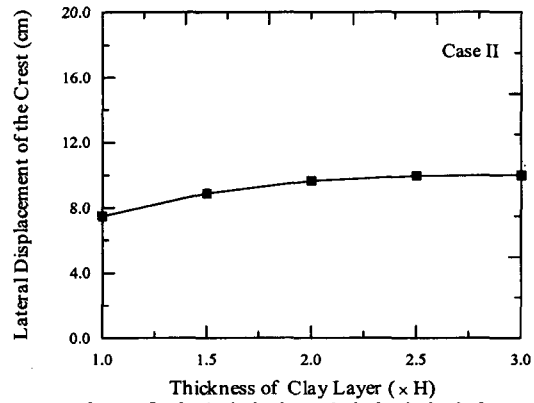


그림 5 토층의 두께에 따른 횡방향 최대 변위

층까지 기초를 내리는 중공 블록식 방파제에 비해 이번 연구에서 제안한 연약지반 방파제는 연약지반의 두께가 클수록 더욱 유리하다는 것을 의미한다.

4.2 부력통의 두께에 따른 거동 특성

연약지반 방파제의 가장 큰 특징 중 하나인 부력통의 크기에 따라 해석을 수행하였다. 부력통의 크기는 방파제 자중과 거의 선형적인 관계가 있으므로 부력통의 크기가 압밀 침하에 직접적인 영향이 있을 것이며, 그림 6에서 그 결과를 확인할 수 있다. 부력통의 두께가 커지면, 방파제의 자중이 작아지고 따라서 압밀 침하도 감소하게 된다. 즉, 과도한 압밀 침하가 예상되는 연약한 지반이라 하더라도 부력통의 크기를 조절하여 얼마든지 침하를 제어할 수 있다는 의미가 된다. 한편, 부력통의 두께가 횡방향 최대 변위에 미치는 영향은 무시할 수 있을 만큼 작게 나타났다.

4.3 설계파 조건에 따른 거동 특성

작용하중에 따른 연약지반 방파제의 횡방향 지지력을 확인하기 위하여 4가지 최대 파고를 적용하여 설계파력을 계산한 후, 이를 이용하여 횡방향 지지력을 고찰해 보았다. 그림 7은 설계파 산정에 사용된 최대 설계 파고에 따른 방파제 천단의 최대 변위를 도시한 것이다.

그림에서 최대 파고(H_{max})와 횡방향 최대 변위는 거의 선형적인 관계를 보이고 있다. 최대 파고가 설계파력에 거의 선형적인 관계를 가지기 때문에 결국, 작용 하중의 크기가 발생 변위에 선형적으로 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4.4 근입깊이에 따른 거동 특성

그림 8은 방파제 기초의 근입깊이와 최대 압밀 침하의 상관관계이며, 방파제 기초가 지표에 놓인 경우에서 1m, 2m, 3m로 점차 근입됨에 따라 압밀 침하가 감

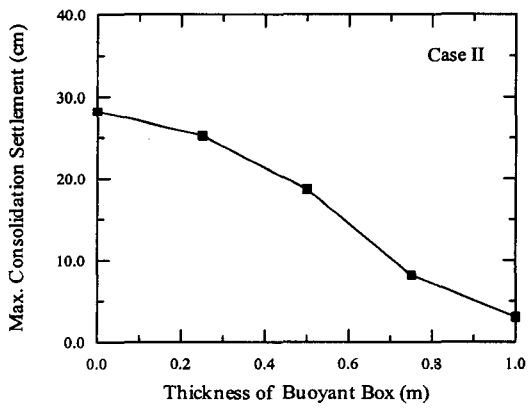


그림 6 부력통의 두께에 따른 최대 압밀 침하

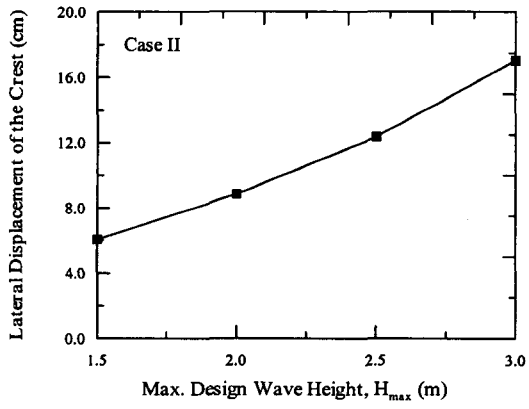


그림 7 설계파 조건에 따른 횡방향 최대 변위

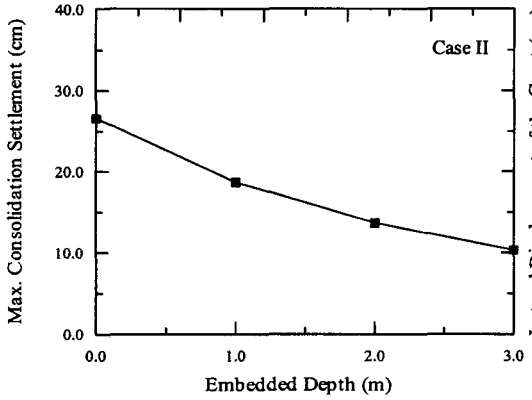


그림 8 근입깊이에 따른 최대 압밀 침하

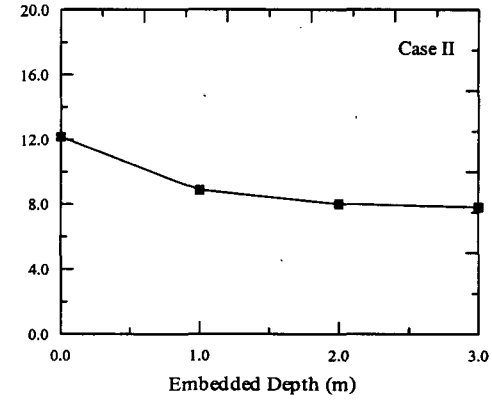


그림 9 근입깊이에 따른 횡방향 최대 변위

소하는 경향을 알 수 있다. 이것은 방파제 기초가 지반 속으로 근입됨에 따라 방파제 기초 위에 놓인 점성토와 기초에 인접한 근입깊이 만큼의 흙들이 점착력을 발휘해 압밀 침하를 억제하는 효과가 나타나는 것으로 볼 수 있다.

연약지반 방파제의 기초부를 지반 속의 근입시킨 것은 방파제 기초의 전면 세굴을 방지하기 위한 것이지만, 수치해석의 결과에서 이로 인해 압밀 침하를 감소시키는 효과를 동시에 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 근입깊이에 따른 방파제 천단의 최대 변위를 나타낸 것으로 기초가 근입되면 지표에 기초가 놓인 경우보다는 변위가 감소하지만, 추가적인 근입깊이에 대해서는 큰 효과가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

4.5 방파제 저판 폭에 따른 거동 특성

방파제의 저판 폭이 증가하면, 방파제 자중도 증가하는 측면도 있지만 압밀의 직접적인 원인이 되는 지반의 응력 증분이 감소하는 원인이 되기도 한다. 그림 10은 3가지 지반조건에서 기초 폭과 최대 압밀 침하의 상관관계를 도시한 것이다. 세가지 지반조건에서 지중벽의 길이가 1.00H인 경우를 제외하고는 대부분 기초 폭이 증가함에 따라 압밀 침하도 감소하는 것으로 나타났다. 지중벽의 길이가 긴 경우에는 지중벽이 압밀 침하에 저항하여 압밀 침하가 작게 발생하는 것으로 나타났으며, 이 경우에는 저판 폭이 증가하더라도 압밀 침하에 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다.

압축지수가 다른 3가지 지반조건에서 압밀 침하의 절대량은 압축지수가 커짐에 따라 증가하지만, 방파제 저판의 폭이나 지중벽의 길이에 따른 경향성은 거의 동일한 것으로 나타났다.

그림 11은 방파제 저판 폭에 따라 방파제 천단의 최대 변위를 비교한 그림이다. 3가지 지반조건에서 모두 저판 폭이 증가함에 따라 급격하게 변위가 감소하는 것으로 나타났다. 저판 폭이 2배 정도 증가하면 천단 변위도 1/2 정도로 감소하는 경향을 보인다.

4.6 지중벽의 길이에 따른 거동 특성

압밀 침하나 설계파에 저항하기 위해 무한정 방파제 저판 폭을 늘일 수 없기 때문에 지중벽을 설치하여 압밀 침하와 횡방향 지지력을 보강하고자 하였다. 지중벽의 길이에 따라 3가지 지반조건에서 발생하는 최대 압밀 침하의 상관관계를 그림 12에서 제시하였다. 그림에서도 알 수 있듯이, 지중벽이 설치되지 않은 경우와 비교하여 지중벽의 길이가 길어질수록 압밀 침하는 급격하게 감소하고 있다. 이것은 지중 응력 증분의 감소가 원인이 아니라, 지중벽이 변위 발생을 억제하는 역할을 하기 때문으로 볼 수 있다. 즉, 지중벽의 길이가 길어지면 저항력을 발휘하는 면적이 증가하기 때문에 침하가 억제되는 것이다.

방파제 저판 폭의 경우와 마찬가지로, 지반조건에 따라 절대적인 값의 차이는 있지만 경향성은 동일하다.

그림 13은 지중벽 길이에 따른 방파제 천단 변위를 비교한 그림으로, 지중벽을 설치하면 지중벽이 설치되지 않은 방파제보다 상당한 변위 감소 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 지중벽이 설치된 방파제에서는 지중벽의 길이의 증가로 얻어지는 변위의 감소 효과는 상대적으로 작게 나타났다.

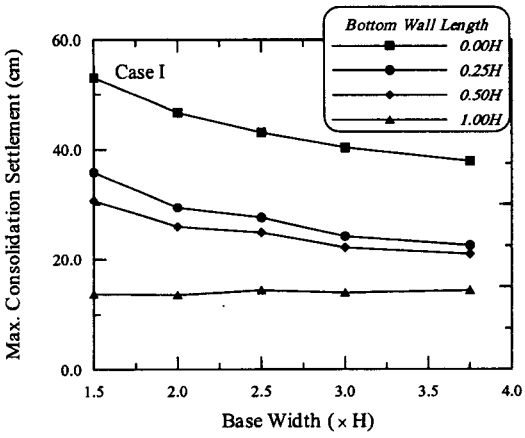
4.7 저판 폭과 지중벽의 길이에 따른 거동

방파제의 저판 폭과 지중벽의 길이가 별도의 영향인자가 아니므로, 그림 14와 그림15와 같이 상호 연관을 시켜 압밀 침하와 횡방향 변위에 미치는 영향을 살펴보았다. 그림에서 방파제의 압밀 침하는 지중벽의 길이가 짧은 경우에만 저판 폭에 다소 영향을 받고 대부분은 지중벽의 길이에 관계된다. 횡방향 최대 변위는 저판 폭과 지중벽에 동시에 관련되며, 저판 폭을 증가시켰을 때 얻어지는 지지 효과의 증가에 비하여 지중벽의 길이의 증가로 얻을 수 있는 지지 효과의 증가가 2배 정도로 나타났다.

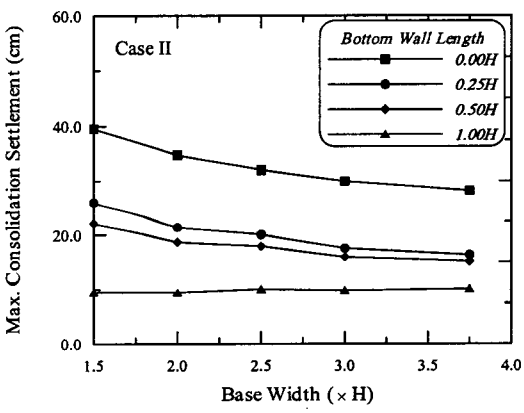
5. 결 론

이번 연구에서는 연약지반용 방파제의 거동 특성을 알아보기 위해 다양한 조건에서 수치해석을 실시하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

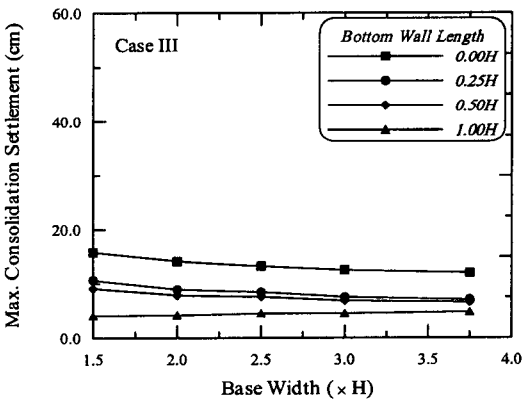
1. 연약지반에서 방파제 하중으로 인해 발생하는 지중 응력은 Boussinesq(1885)의 탄성해를 이용하여 산정한 응력과 달리 지반의 소성 거동으로 인해 기초 폭 정도의 심도에서 거의 소멸되는 것으로 나타나, 연약지반 방파제의 압밀 침하와 횡방향 최대 변위는 압밀층의 두께가 기초 폭 정도일 때 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다.
2. 연약지반 방파제의 기초부를 지반 속의 근입시킨 것은 방파제 기초의 전면 세굴을 방지하기 위한 것이지만, 동시에 근입시킨 기초 위 지반의 상호작용으로 압밀 침하를 감소시키는 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 횡방향 지



(a) Case I

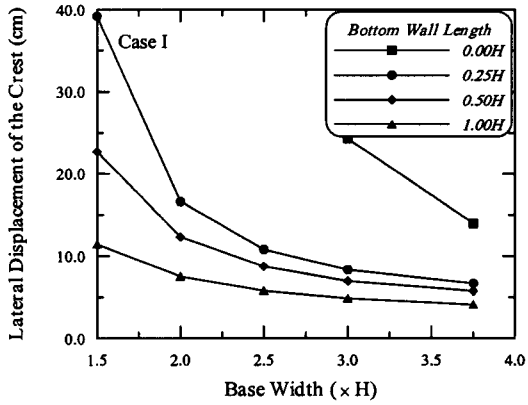


(b) Case II

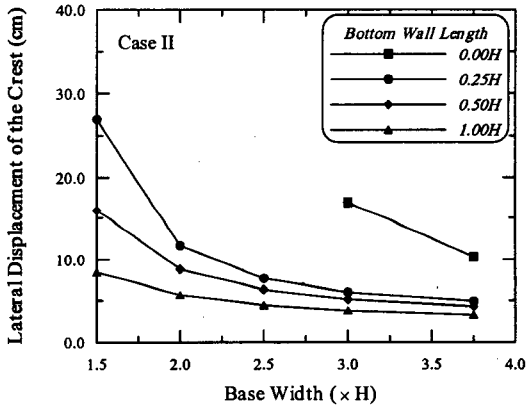


(c) Case III

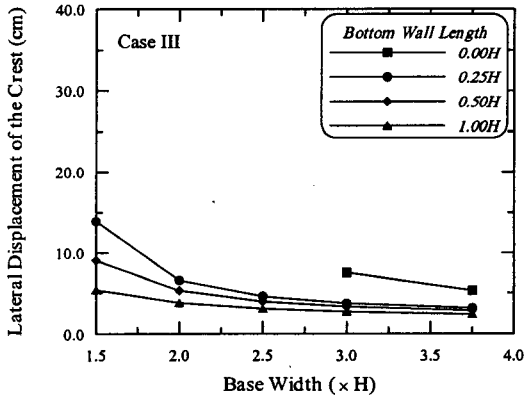
그림 10 저판 폭에 따른 최대 압밀 침하



(a) Case I

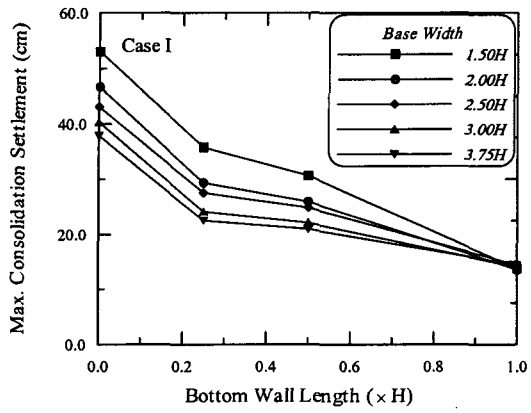


(b) Case II

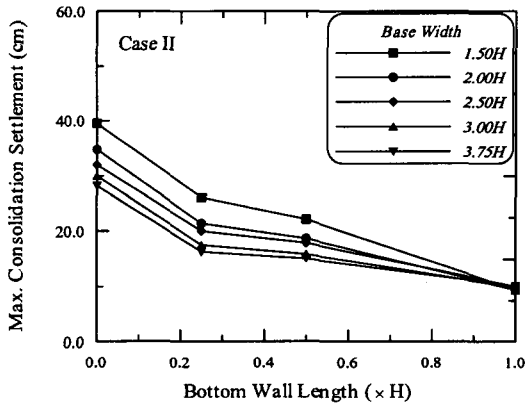


(c) Case III

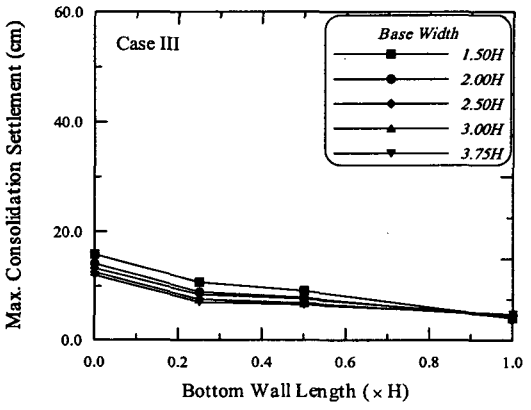
그림 11 저판 폭에 따른 횡방향 최대 변위



(a) Case I

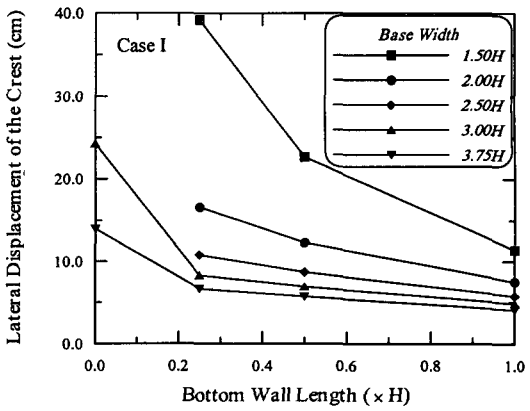


(b) Case II

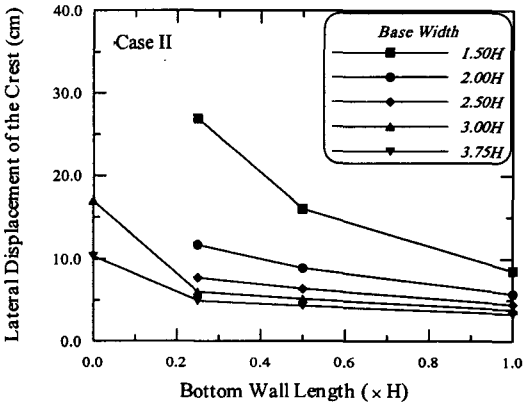


(c) Case III

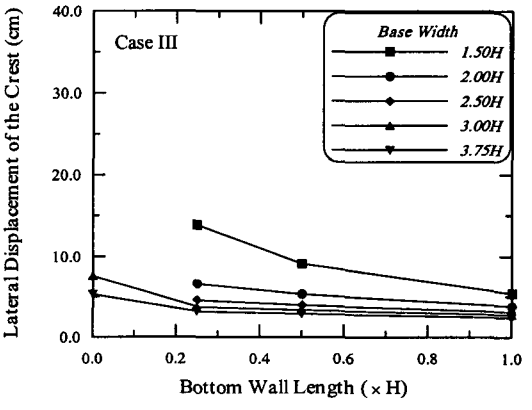
그림 12 지중벽의 길이에 따른 최대 압밀 침하



(a) Case I

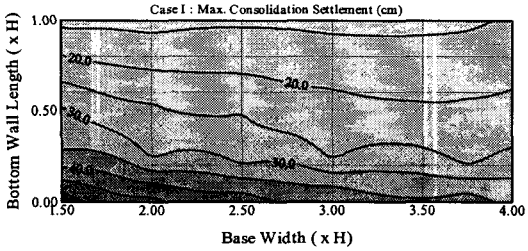


(b) Case II

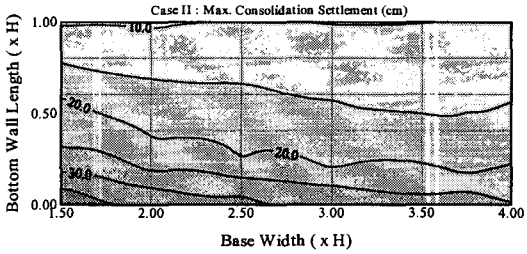


(c) Case III

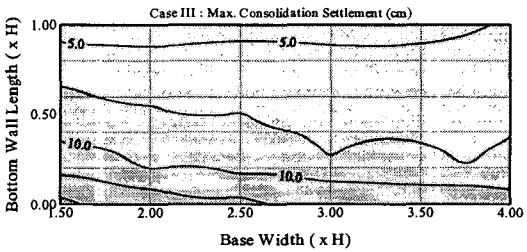
그림 13 지중벽의 길이에 따른 횡방향 최대 변위



(a) Case I

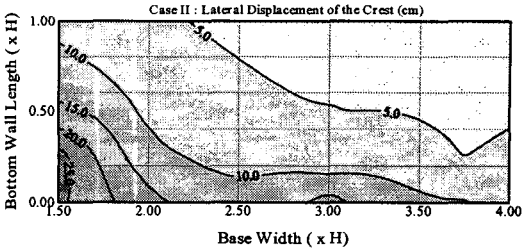


(b) Case II

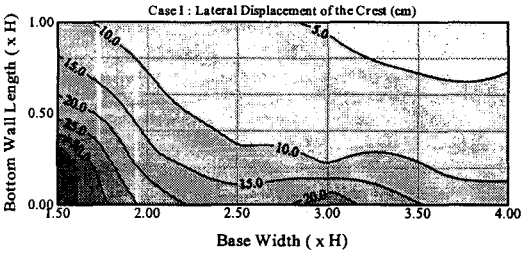


(c) Case III

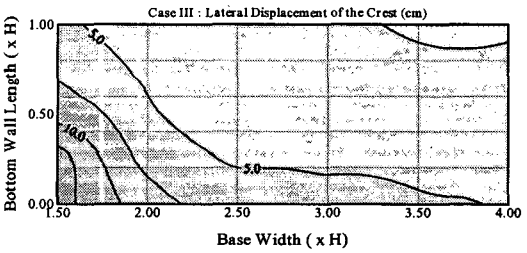
그림 14 저판 폭과 지중벽 길이에 따른 압밀 침하



(a) Case I



(b) Case II



(c) Case III

그림 15 저판 폭과 지중벽 길이에 따른 횡방향 변위

지력 측면에서는 지표에 기초가 놓인 경우보다는 지지 효과가 증가하지만, 근입깊이가 증가해도 더 이상의 횡방향 지지 효과는 증가하지 않았다.

3. 방파제 저판 폭이 증가할수록 압밀 침하는 감소하고 횡방향 지지력은 증가한다. 지중벽을 설치하면 압밀 침하는 감소하고 횡방향 지지력이 증가한다. 지중벽의 설치는 압밀층의 두께 감소와 지지력 확보 등의 이유로 저판 폭보다 압밀 침하에 더 큰 영향을 미치며, 지중벽의 길이가 충분히 길다면 저판 폭은 압밀 침하에 무관한 것으로 나타났다.
4. 지중벽을 증가시켜 얻을 수 있는 지지력 증분은 저판 폭을 증가시켜 얻을 수 있는 횡방향 지지력의 증분의 2배 정도의 효과를 나타낸다.

사 사

본 연구는 해양수산부 '대수심방파제 및 연약지반 관련기술' 연구용역의 일환으로 수행된 것입니다.

참고문헌

권오순, 장인성, 박우선, 염기대, 2001. 횡하중을 받는 연약지반용 방파제의 거동. 대한토목학회 논문집, 21, 3-B, 237-247.

門司剛至, 村山伊知郎, 元野一生, 高田直和, 1989. 軟弱地盤着底式防波堤開發. 海洋開發論文集, 第 5 卷, 103-107.

運輸省 港灣技術研究所, 八幡製鐵, 1963. Hパイルの水平抵抗に關する研究, pp. 345-353.

Anonymous, 1998. *ABAQUS manual - Version 5.8.* Hibbit, Kalsson and Sorenssen Inc.

Biot, M.A., 1941. General theory of three-dimensional consolidation, *Journal of Applied Physics*, 12, 155-164.

Boussinesq, J., 1885. *Application des Potentials a L'Etude de L'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques.* Gauthier-Villars, Paris.

Broms, B.B., 1964. Lateral resistance of piles in cohesive soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 90, SM2, 27-63.

Broms, B.B., 1964. Lateral resistance of piles in cohesionless soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 90, SM3, 123-156.

Brugger, P.J., Almeida, M.S.S., Sandroni, S.S. and Lacerda, W.A., 1998. Numerical analysis of the breakwater construction of Segipe Harbour, Brazil. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 1081-1031.

Duncan, J.M. and Buchignani, A.L., 1976. An engineering manual for settlement studies, *Geotechnical Engineering Report*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, 94

Hsiung Y. and Chen, Y., 1997. Simplified method for analyzing laterally loaded single piles in clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 11, 1018-1029.

Mayne, P.W., Kulhawy, F.H. and Trautmann, C.H., 1995. Laboratory modeling of laterally-loaded drilled shafts in clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 12, 827-835.

Meyerhof, G.G., 1953. The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads, *Proceedings of 3rd International Conference, Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, 440.

Poulos, H.G., 1981. Pile foundations subjected to lateral loading, *Symposium on Geotechnical Aspects of Coastal and Offshores Structures*, Bangkok, 79-93.

Rao, S.N., Ramakrishna, V.G.S.T. and Rao, M.B., 1998. Influence of rigidity on laterally loaded pile groups in marine clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 6, 542-549.

Rollins, K.M., Peterson, K.T. and Weaver, T.J., 1998. Lateral load behavior of full-scale pile group in clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 6, 468-478.

Schofield, A.N. and Wroth, C.P., 1968. *Critical state soil mechanics*, New York, McGraw-Hill.

Skempton, A.W. and Bjerrum, L., 1957. A contribution to the settlement analysis of foundations on clay. *Geotechnique*, 7, 168.

Terzaghi, K., 1943. *Theoretical soil mechanics*, Wiley, New York.