

# 파랑-지반-구조물의 상호작용해석

박우선 (한국해양연구소 연안공학연구부 선임연구원)

## 1. 서 언

지구상의 모든 물체는 외부로부터 어떤 힘을 받을 때 정도의 차이가 있을 뿐 항상 지반과 함께 움직이게 된다. 예를 들면, 63빌딩에 바람이 작용할 때, 자동차가 달릴 때, 심지어 사람이 길을 걸을 때도 지반은 변형을 일으키며 또 반작용력을 발생시키게 된다. 이러한 상호작용 현상은 지반이 단단한 경우에는 그다지 중요하지 않지만 연약한 경우에는 구조물의 안전성면에서 아주 중요하게 된다. 외해 파랑을 차단하는 방파제, 호안(護岸) 등의 연안구조물인 경우도 예외 일 수는 없다. 오히려 구조물의 거동과 지반의 거동에 의해서 내습(來襲)하는 파랑이 변형되어 보다 복잡한 양상을 띠게 된다고 할 수 있다. 최근 연안구조물의 설치 지점이 점차 높은 파랑의 대수심, 연약지반의 열악(劣惡)환경 하로 이동되고 있어, 연안 및 해양 구조물의 설계에 있어서 파와 구조물 그리고 지반을 종합적으로 검토할 것을 강조하고 있다. 특히, 매립 등을 통하여 산업용 항만부지 또는 국민 휴식을 위한 친수공간

을 확보하고자 하는 경우에는 대부분의 지반이 연약 조건 하에 놓이게 되므로 안전성이 확보된 경제적인 설계가 요구되며, 이를 위해서는 구조물-지반 상호작용 문제의 적절한 처리가 대단히 중요하게 된다.

그림 1은 매립된 지역의 호안 구조물 배후의 콘크리트 포장이 파손된 장면이다. 이 붕괴의 직접적인 원인은 콘크리트 포장하 매립토의 침하로 볼 수 있는데, 이 매립토의 침하는 호안구조물의 지면을 통하여 외해 쪽으로 토사(土砂)가 유출되었기 때문에 발생한 것이다. 매립토의 유출에 기여한 주된 외력으로는 조석과 파랑을 생각할 수 있다. 이 중 조석은 변동 주기가 아주 길기 때문에(약 12시간 30분) 직접적인 원인을 제공하지 못하고, 10초 전후의 단주기 파랑이 주된 영향을 미친 것으로 판단된다. 조석은 단주기 파랑의 작용시 해수위 및 매립토 내의 평균 수위의 상승 및 하강에 기여하여 간접적으로 영향을 주는 정도로 볼 수 있다. 따라서, 토사유출의 주원인은 호안구조물 배후의 매립토까지 전달된 단주기 파랑에 의한 동수압(動水壓)으로 판단되어진다. 이러한 현상을 수치적으로

모의하고자 할 때는 파랑과 콘크리트 구조물 그리고 지반 및 배후의 매립토의 상호작용을 적절히 고려하여야 한다. 특히, 지반이 연약한 경우에는 상호작용 해석을 수행하여야만 좋은 결과를 얻을 수 있다.

본 고에서는 파랑-구조물-지반의 상호작용에 관련된 기존의 연구결과를 살펴보고, 최근 필자가 개발한 파랑-구조물-지반의 상호작용 문제를



그림 1. 파손된 호안구조물

효율적으로 모의할 수 있는 수치모델(朴 등, 1996)을 이용한 예제해석결과를 소개함으로써 그 필요성 및 중요성을 살펴보고자 한다.

## 2. 상호작용에 관한 기존연구

파랑과 해저지반의 상호작용에 관한 연구는 1941년 Biot가 간극수를 포함한 지반의 거동에 관한 식을 발표한 이후에 많이 이루어졌다. 대표적인 연구로는 Putnam (1949), Madsen (1978), Yamamoto 등 (1978), Mei and Foda (1981), Yamamoto (1983)의 논문을 들 수 있다. 국내의 관련 연구는 전무하였으나, 최근 김 등 (1997)이 Yamamoto (1983)의 해를 일정흐름 하의 파랑-지반의 상호작용에 대한 해석해로 확장하였다. 이들의 연구를 결과를 살펴보면 파랑은 물리적으로 지반의 변형과 간극수의 흐름으로 표시되는 해저지반 내에 탄성파를 발생시키고, 이는 다시 파랑을 변형시키는 등 상호작용을 일으키고, 그 정도는 지반이 연약할수록 상대수심이 낮을수록 큼을 알 수 있다. 또한, 이 해석해를 이용하여 해저지반의 전단파괴, 액상화 발생 등의 가능성에 대한 연구도 수행되어졌다 (Madsen, 1978; Yamamoto, 1978; 廣部 등, 1996).

구조물을 고려한 연구는 콘크리트 케이슨식 구조보다는 더 재래의 방파제형식인 사석방파제에 대상으로 체체 내부 간극수의 흐름과 사석의 안정성에 초점을 두고 해석을 수행되어져 왔다(Barends, 1986; Wibber and Oumeraci, 1992). 그러나 콘크리트 케이슨 방파제를 많이 채택하고 있는 일본에서는 최근에 대한 고려도 빈번이 행해지고 있다(間瀬 등, 1989, 1991; 高橋 등, 1994). 기존의 대부분의 경우가 상호작용문제를 다루기 보다는 주위진 파동장하에서의 구조물 및 지반의 해석에 중점을 두워 수행되어졌다. 지반이 견고한 경우에는 상호작용의 영향을 고려하지 않아도 비교적 타당한 결과를 얻을 수 있으므로 이들의 결과는 유용한 것으로 판단된다.

파랑-지반-구조물의 상호작용을 고려한 연구로는 최근 수행한 필자의 연구를 들 수 있다. 필자는 파랑

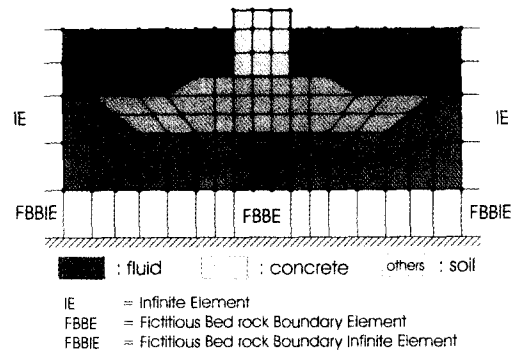
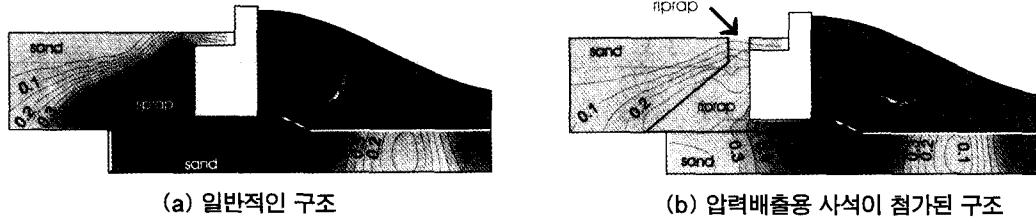


그림 2. 유한요소격자망도

이 다공질의 해저지반을 진행하여 방파제 또는 호안 구조에 작용하는 경우에 대한 상호작용해석을 효율적으로 수행할 수 있는 유한요소모델을 개발하였다(朴 등, 1996). 이 모델은 파동장(波動場)과 지반 및 구조물을 Galerkin 기법을 이용하여 동시에 유한요소로 모형화하는 선형모델로, 파동장의 수입자의 거동은 선형파 이론을 사용하여 나타내었으며, 지반의 토립자 골격의 변위와 간극수의 거동은 기존의 대부분의 연구에서 채택한 바 있는 Hooke's law와 Darcy's law가 혼합된 Biot 방정식을 사용하여 나타내었다. 일반적으로 이와 같은 경계치 문제는 수평방향 또는 연직방향으로 무한한 해석영역을 지니게 된다. 따라서, 유한요소기법으로 해석을 가능하게 하기 위해서는 이 해석영역의 무한성을 적절히 처리하여야 한다. 본 모델에서는 주 관심영역은 기존의 유한요소로 모형화하고 이를 제외한 영역은 특수한 요소로 모의하는 방법을 사용하였다. 즉, 파동장 및 지반의 수평방향 무한성은 무한요소로 나타내었으며, 지반의 연직방향의 무한성은 가상의 바닥경계요소라는 특수한 요소를 사용하여 모형화하였다. 그림 2는 본 모델을 이용하여 해석을 수행하기 위한 유한요소 격자망의 한 예를 보인 것이다.

## 3. 상호작용 해석에

그림 3에 나타낸 것은 필자가 개발한 모델을 이용하여 계산된 케이슨식 호안구조물 배후에 작용하는



(a) 일반적인 구조

(b) 압력배출용 사석이 첨가된 구조

그림 3. 호안구조물 주변 흙내의 최대 간극수압 분포도

최대 간극수압(間隙水壓)의 분포도이다. (a)에 보인 것은 배후 매립토를 통상의 방법으로 조성한 경우에 대한 결과이며, (b)에 보인 것은 호안 구조물 배후에 굵은 사석으로 구성된 압력배출기를 설치한 경우에 대한 결과이다. 통상의 호안구조물에 대한 결과를 보면, 배후 매립토의 최대 간극수압이 전면에 작용되는 최대 파압과 거의 같음을 알 수 있다. 반면, 압력배출기가 설치된 경우는 1/3이하로 떨어진 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 수리실험에서도 계속된 바 있다. 日本 港灣技術研究所의 高橋 등 (1996)은 호안 구조물 배후 매립토의 유출현상에 대한 수리실험 수행시 간극수압의 계측을 통하여 상기의 현상을 확인하였으며, 또 배후면의 높은 변동 간극수압을 토사 유출현상의 주원인으로 설명하였다. 그림 1에 보인 붕괴 현상의 원인도 이와 같은 관점에서 설명할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 율파에 의한 후면보호 및 차량통행을 위한 콘크리트 포장에 높은 간극수압을 발생시키는 원인으로 작용하였을 것으로 보여진다.

일반적으로 지반이 연약해지면 토입자의 운동이 심해지게 되며, 토입자의 운동이 심해지게 되면 토립자 간의 마찰에 기인한 에너지 손실이 크게 발생하게 된다. 그림 4는 이와 같은 현상을 이용하여 개발되고 있는 새로운 개념의 소파시스템에 대한 개념도이다. 그림에 보인 바와 같이 해저면에 일정깊이의 사지반을 조성하여 사지반 저면에 설치된 일련의 파이프를 통하여 물을 공급하여 주면, 지반 내의 간극수압이 증가하게 되고 공급 유속이 크게 되면 액상화 상태에 이르게 된다. 이 때 지반 위를 진행해 가던 파랑은 지반과 상호작용을 일으켜 앞에서 설명한 이유로 인하여 많은 에너지를 소모하게 된다. 그림 5에 Takahashi 등

(1994)이 수행한 수리실험을 통하여 얻어진 전달율(입사파고에 대한 소파시스템을 통과한 파랑의 파고비)을 나타내었다. 동수구배  $i$ 가 증가함에 따라 (공급 유속이 커짐에 따라) 전달율이 감소하다가 어느 정도 보다 커지면 전달율이 다시 증가되는 현상을 볼 수 있다. 이와 같은 소파특성은 수치모의 결과에서도 찾아볼 수 있다. 사지반의 전단계수  $G$ 와 Coulomb 감쇠계수  $\delta$ 의 변화에 따른 전달율을 나타낸 그림 6을 살펴보면, 전단계수  $G$ 가 감소함에 따라 전달율이 감소하다가 다시 증가하게 되는 것을 볼 수 있다. 수리실험 결

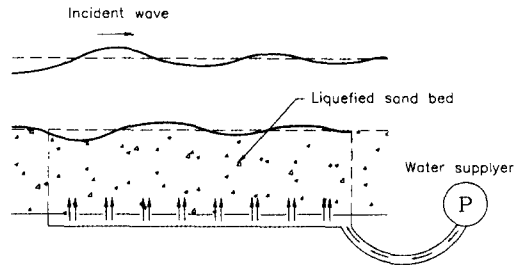


그림 4. 사지반 액상화를 이용한 신형 소파시스템

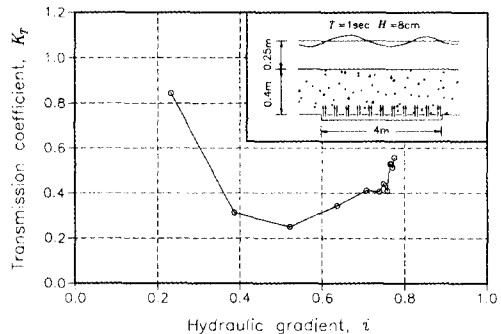


그림 5. 신형 소파시스템의 파랑전달특성 (수리실험결과)

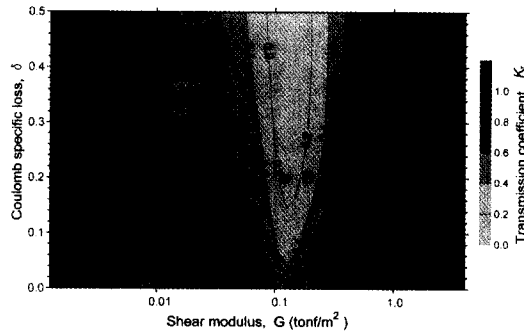


그림 6. 신형 소파시스템의 파랑전달특성 (수치모의결과)

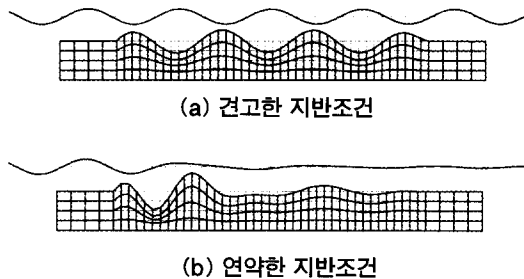


그림 7. 변형된 파랑과 해저지반

과의 동수구배와 사지반의 특성,  $G$ ,  $\delta$ 와의 관계가 아직 알려져 있지를 알아 직접적으로 비교할 수는 없으나 에너지 소모경향은 서로 같음을 알 수 있다. 그림 7에 보인 것은 그림 6의 점 A, B 두 지반조건에 대한 전달 파랑과 사지반의 거동을 나타낸 것이다. (a)는 지반이 비교적 단단한 경우로 대부분의 파랑이 전달되고, 사지반은 수면변위와  $180^\circ$  위상차를 보이며 거동하고 있음을 알 수 있다. 반면, 지반이 액상화 조건에 거의 근접한 (b)의 경우는 대부분의 파랑이 소모되고 수면 변위와의 위상차도 (a)의 경우와는 많이 다를 수 있다(약  $90^\circ$  정도).

이외에 파랑-지반-구조물의 상호작용을 고려해야만 하는 또 다른 예로서는 사석방파제 또는 혼성방파제의 제체(堤體) 또는 지반을 통한 투수현상 모의, 대형 부유식 구조물 주변 연약지반의 안정성 평가 등을 생각할 수 있다. 그림 8은 사석 마운드의 투수계수,  $k$ 의 변화에 따른 케이슨식 방파제의 후면 전달율을 나

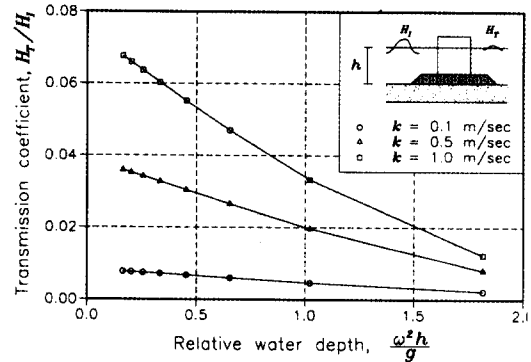


그림 8. 케이슨식 혼성제의 마운드 사석을 통한 파랑전달특성

타낸 것이다. 마운드 사석의 투수율이 커질수록, 상대 수심이 낮아질수록 전달율이 증가됨을 볼 수 있다. 수리실험을 통하여 계측된 저면을 통한 전달율이 3~5% 정도로 보고되고 있는 것을 감안해 보면(倉田 등, 1980) 본 결과는 타당한 것으로 보여진다.

#### 4. 결 언

산업발전에 따른 국민의 생활수준의 향상은 더 많은 문화 휴식공간의 확보를 요구하게 되었고, 친수공간으로서의 연안역 개발의 필요성이 더욱 증대되고 있다. 특히, 지방자치체의 활성화가 기대되는 현시점에서 이에 대한 욕구는 더욱 커질 것으로 판단된다. 이러한 추세는 연안구조물의 설치지점을 파랑이 높고 연약지반의 환경으로 점차 확대 이동시켜 놓고 있으며, 이에 적합한 새로운 구조형식 및 설계기법의 개발을 요구하고 있다. 열악환경하에서 안정성이 확보되고 보다 경제적인 설계를 위해서는 파랑-지반-구조물의 상호작용을 보다 엄밀히 고려하여야 할 것으로 판단된다. 따라서, 앞에 보인 수치적 연구의 활성화 뿐만 아니라 수리실험을 이용한 연구도 병행되어야 할 것으로 판단된다. 특히, 이러한 문제는 수리, 토질, 구조 어느 한 분야만의 문제가 아닌만큼 각 관련 전문가들의 총체적인 관심이 요구된다고 할 수 있다. ●

〈참고 문헌〉

- 김범형, 이길성, 박우선, 1997, 일정 흐름장에서의 파랑과 다공질 탄성 해저지반의 상호작용, 1997년도 정기학술강연회 발표논문 초록집, 한국해양 해양공학회, (발표예정).
- Barends, F.B.J., 1986, Geotechnical aspects of rubble mound breakwaters, *Developments in breakwater*, Thomas Telford, London, 155-174.
- Biot, M.A., 1941, General theory of three-dimensional consolidation, *Jour. of Applied Physics*, 12, 155-164.
- Madsen, O.S., 1978, Wave-induced pore pressure and effective stresses in a porous bed, *Geotechnique*, 28(4), 377-393.
- Mei, C.C. and Foda, M.A., 1981, Wave-induced responses in a fluid-filled poro-elastic solid with a free surface - a boundary layer theory, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 66, 597-631.
- Putnam, J.A., 1949, Loss of wave energy due to percolation in a permeable sea bottom, *Transactions American Geophysical Union*, 30(3), 349-356.
- Takahashi, S., Yamamoto, S., and Miura, H., 1994, Fundamental characteristics of a new wave absorbing system using sand liquefaction, *Proc. 24th ICCE*, 2698-2711.
- Yamamoto, T., 1978, Sea bed instability from waves, *OTC 3262*, 1819-1828.
- Yamamoto, T., 1983, On the Response of a Coulomb-damped poroelastic bed to water waves, *Marine Geotechnology*, 5(2), 93-130.
- Yamamoto, T., Koning, H.L., Sellmeijer, H., and Hijum, E.V., 1978, On the response of a poro-elastic bed to water waves, *J. Fluid Mechanics*, 87(1), 193-206.
- Wibber, H. and Oumeraci, H., 1992, Finite element simulation of wave-induced internal flow in rubble mound structures, *Proc. 23th ICCE*, 1706-1719
- 朴佑善, 高橋重雄, 鈴木高二郎, 姜閔求, 1996, 波-地盤-構造物の相互作用に関する有限要素法解析, *海岸工學論文集*, 43, 1036-1040.
- 倉田克彦 等, 1980, 混成堤捨石マウンドからの透過現象に関する考察, 第27回海岸工學講演會論文集, 401-405.
- 高橋重雄, 下迫健一郎, 上部達生, 1994, 衝擊碎波力に對する防波堤ケーソンの動的舉動, *港灣技術研究所報告* 第33卷 第2, 59-86.
- 間瀬 肇, 川迫郁夫, 酒井哲郎, 1991, 混成堤基礎地盤の波浪應答に関する研究, *海岸工學論文集*, 38, 129-133.
- 間瀬 肇, 酒井哲郎, 西村喜弘, 前野賀彦 1989, 多孔質弾性理論による防波堤に作用する揚壓力および周邊地盤内の變動間隙水壓の解析, *土木學會論文集*, 第411 /II-12, 9-17.
- 高橋重雄, 鈴木高二郎, 徳淵克正, 岡村知光, 下迫健一郎, 善功企, 山崎浩之, 1996, 護岸の吸い出しに関する水理模型實驗, *港灣技術研究所報告*, 35(2), 3-58.
- 高橋重雄, 下迫健一郎, 上部達生, 1994, 衝擊碎波力に對する防波堤ケーソンの動的舉動, *港灣技術研究所報告*, 33(3), 59-86.
- 廣部英一, 石田啓, 矢富盟祥, 由比政年, 1996, 波浪による海底地盤内の有効應力の分布特性および地盤の破壊領域, *海岸工學論文集*, 43, 1026-1030.