

잔교식 안벽의 상부와 Pile에 작용하는 파압분포에 관한 실험적 연구

(The Experimental Study of Distribution Life-Force Impact
on Piles and Landing Pier.)

박상길* , 김기현** , 김우생** , 박병열*** , 강덕훈***

Sang Kil Park, Ki Hyun Kim, Woo Seang Kim, Byung Yul Park, Deok Hun Kang

요 지

항만건설에 있어서 항만의 내부시설 중에서 무엇보다도 가장 중요한 시설물은 선박을 안전하게 접안시켜 하역할 수 있는 안벽시설물이다. 안벽구조 형식의 결정은 항만의 이용목적 등에 따라서 달라지지만 항만의 건설입지조건 등에 의해서도 달라진다. 안벽구조형식 중에서 잔교 식 안벽은 무엇보다도 단기간에 건설이 용이하여 지금까지 각국에서 널리 사용되어 왔고 장래에도 이용도가 증가되리라 생각한다. 최근에는 해안선을 이용한 위락시설이 건설되면서 잔교 식 안벽구조물을 설치하여 보조시설물로 이용하는 경우가 많다.

과거에 설계되어 잔교를 설계할 경우는 일반적으로 항내의 정온이 잘 유지되는 경우에 대해서 설치하는 경우가 많기 때문에 파랑에 의한 반사율과 잔교 상부에 작용하는 양압력을 고려해야할 필요성이 거의 없었다. 그러나 최근에는 태풍이 내습할 경우 기존의 항내로 높은 파랑이 침입하는 경우가 발생하고 있어 항내에서도 잔교의 파괴로 인한 자연재해가 대형화되는 경우가 발생하고 있다. 또, 처음부터 안벽을 설계할 때에 대형화의 잔교 식 안벽구조물을 설치하는 경우도 있다. 이런 잔교 식 안벽 구조물을 잔교의 상부 판에 작용하는 양압력 분포와 잔교 전면의 반사율 등이 구조물의 유지관리 등에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 반사율 검토와 양압력을 고려한 설계가 필요하다. 본연구의 대상은 일정 해역에 잔교 식 안벽을 설계하고자 할 때 최적의 안벽 설계가 될 수 있도록 수리모형실험을 실시하여 구조물의 안전과 항내정온에 기초가 되는 자료를 도출하고자 하였다. 따라서 본 수리모형실험으로 인한 연구는 잔교 식 안벽에 대한 반사율과 상부에 작용하는 양압력, 잔교말뚝(pile)에 작용하는 수평압력을 검토하여 잔교 식 안벽 설계에 기초자료를 제공하고자 한다.

핵심용어: 양압력, 반사율, 수평파력, 잔교 식 안벽, 수직 및 경사말뚝

1. 서 론

우리나라 항만의 인지도는 짧은 역사를 갖고 있으면서도 입지조건이 원만하여 세계적으로 잘 알려져 있고 동시에 물동량처리를 할 수 있는 시설면도 매우 우수한 상태로 인정받고 있다. 이러한 시설능력을 갖춘 항은 기존의 항만보다 새로 건설되는 신항만에 집중되어 있는 상태이다. 그러나 기존의 항만은 처음부터 전반적인 계획이 수립되어 건설된 항이 아니고 필요에 따라 증설되었던 항만이기 때문에 여러 측면에서 새로 건설되는 항만보다 기능이 떨어지고 있다. 항만의 기능이란 여러 가지가 있지만 그중에서도 접안시설이 하역능력을 높이는 가장 큰 요소로 작용하고 있다. 접안시설이란, 선박이 육지와 만나는 곳으로 선박이 안벽에

* 부산대학교 토목공학과 교수 · E-mail : sakpark@pusan.ac.kr
** 부산대학교 토목공학과 산업대학원 석사 과정 · E-mail : wooseang@msn.com
*** 부산대학교 토목공학과 석사 과정 · E-mail : byungyulp@hanmail.net · E-mail : huni8110@hanmail.net

접안하여 하역과 선적이 원만하게 이루어 질 수 있는 총체적인 시설물이다. 하역의 용량을 높이는 가장 근본적인 시설은 접안시설보다 하역기계의 성능과 하역기계의 운영이라고 하겠다. 하역기계의 기능을 충분히 발휘하기 위해서는 안벽의 구조적인 시설의 안정이 가장 중요하다. 새롭게 신설되는 항만은 대수심인 곳에 대형 케이슨을 제작하여 설치하므로 안정된 안벽시설이 되지만, 기존의 안벽시설이나 기타 야적장으로 이용되고 있는 안벽은 구조적인 취약점을 보완해야할 필요성이 있다. 동시에 잔교 식 안벽을 설치하여 선박이 정박하여 하역을 손쉽게 할 수 있는 시설물로서는 비교적 경제적인 설계가 가능한 잔교 식 안벽을 들 수 있다. 기술적으로는 연약지반과 조석간만의 차이가 큰 곳도 잔교 식 안벽을 설치하면 시공 및 유지관리 측면에서 다소 유리할 수 있다. 이들 설계에 대해서는 양압력, 수평과력, 반사율 등의 항만 공학적인 평가 기준에 의해서 평가되는 시설물로서 건설 등에 대해서는 신중한 판단이 요구 된다. 또, 항만시설의 재정비차원에서 설계 당시 검토되지 않았던 직항 식 횡잔교와 사항 식 횡잔교에 관해서 상판에 작용하는 양압력과 Piles에 작용하는 파압에 관해서 검토가 되어야 한다. 현재의 설계의 기본방침은 어느 정도 파랑내습이 예상되는 지점에서는 잔교의 상부 공 및 연결 판에 대한 파의 양압력에 대하여 검토를 요구하고 있다. 특히, 연결 판 등의 양압력에 대한 안정 또는 말뚝의 인발 저항력과, 상부 공 연결 판 등의 양압력 및 이에 대한 부재강도에 대해서는 수면부근의 수평 판에 작용하는 양압력에 준하는 기준을 만족시키도록 되어 있다. 이러한 기준을 만족시키기 위해서는 해상조건에 따라서 구조물에 충격적인 파압(양압력)이 발생하여 위험이 있다고 판단되면 수리모형실험 등의 적절한 방법에 통하여 충격적인 양압력을 산정하여 구조물이 안정을 갖도록 해야 한다. 잔교의 상부공과 말뚝 형태의 돌핀과 같이 정수면 위에 일정공간을 갖는 구조물은 정수면상에서 상승하는 파면이 구조물의 저면과 충돌하여 충격적인 양압력이 작용한다.

특히, 파형경사가 크고, 정수면상의 공간(Clearance)이 적은 경우는 큰 양압력이 발생되고 있다. 또, 파가 중복파로 되어 작용하는 경우 파면의 상승속도가 크게 되어 양압력도 크다. 지금까지 양압력에 영향을 주는 요소는 파형경사, 상판의 길이, 공간의 크기, 파면이 상판에 충돌하는 속도, 파면과 상판이 이루는 각도, 파형, 상판의 형상, 압축된 공기층 등이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 요소를 감안한 수리모형실험을 실시하여 잔교의 실시 설계시에 기초자료가 되는 상판에 작용하는 양압력분포와 반사율 그리고 piles에 미치는 수평과압의 특성을 밝히고자 한다.

2. 잔교상판에 작용하는 양압력의 연구

양압력에 대한 연구는 1964과 1965년도에 神戸港 摩耶突堤의 강관말뚝 잔교및 和歌山 북항의 住友금속공업의 강관말뚝 잔교가 파괴된 재해를 계기로 잔교 상부공에 작용하는 양압력을 취급하는 연구가 시작되면서 이시기에 永井, 伊藤, 室田등의 연구진에서 연구 성과를 발표하였다. 그 이후 부가질량이론을 사용해서 전 양압력을 구한 식이 室田에 의해서 제안되고, 谷本등에 의해서 부가질량을 기본으로하는 파력의 발생기구에 대하여 연구결과를 발표하였다. 이들의 연구를 간단히 요약하면 다음과 같다. 伊藤와 竹田(1967)는 잔교모형을 제작하여 잔교 밑면에 작용하는 양압력과 이것에 대한 渡版및 잔교상부공의 안정성에 있어서 실험적 연구를 실시하여 渡版과 같은 자중을 갖고 대항하는 구조물에 대해서는 낙하와 진동한계에 대응하는 안정중량을, 상판과 같이 부재의 강도를 갖고 대항하는 구조물에 대해서는 등가정하중을 실험공식으로 제안했다. 즉, 渡版에 작용하는 양압력과 도관의 진동한계중량 및 낙하한계중량을 구하여 이것을 양압력으로 산정하고 있다. 室田의 연구는 상판에 작용하는 파압을 측정하고 실험결과를 기초로 하여 양압력산정의 실험식을 제안하였다.

이 경우 파압의 공간적 분포에 관한 상세한 설명은 없지만, 파압이 상당히 크게 산정되므로 실용면에서 매우 안전한 식으로 유용한 방법이라고 생각된다. 여기서는 양압력의 특성을 파고와 Clearance의 비에 따라서 다음의 3가지로 분류하였다. 1) 동일 크기의 충격이 꼭 한파로 나타나는 경우는 $H_u/d_o=1.2$
 2) 큰 충격과 적은 충격이 꽤 규칙적으로 나타나는 것으로 충격 값이 큰 변동이 없는 경우 $1.2 > H_u/d_o > 1.0$
 3) 충격 값이 나타나는 것이 규칙성이 없는 경우 $H_u/d_o < 1.0$. 이와 같은 양압력은 파파메타가 H_u/d_o 이므로 특성이 이것에 의해서 변화한다. 이것을 이용하여 식(7)과 (8)을 제안했다. 谷本の 연구는 (1978) 같은 수평판에 작용하는 양압력을 산정하는 방법을 Wagner의 이론에 기초하여 나타내고 있다. 이 산정법에서는 파면과 수평 판이 충돌하는 각도 β 와 충돌속도 V_{∞} 을 Stokes의 제3차3차 근사 파에 의해 주고 충격 압의 공간적 분

포와 시간적 변화를 구할 수가 있다. 단, Stokes의 제3차 근사 파를 쓰고 있기 때문에 계산이 조금 복잡하다. 이 계산법은 저면이 평탄한 경우를 대상으로 하고 있고 보토의 잔교와 같이 슬래브에 거더나 보 등이 있어 공기가 갇혀있거나 파면의 교란이 발생하고 충격력은 저면이 평탄한 수평 판의 경우보다는 작아진다. 따라서 산정법에서 계산되는 값은 보통의 잔교에 있어서의 양압력의 상한치로 생각할 수 있다. 저면이 평탄한 수평 판에 작용하는 양압력인 진행파의 경우는 수면부근에 고정된 수평 판에 진행파가 작용하는 경우에도 충격적인 양압력은 작용한다. 谷本(1977)은 중복파가 작용하는 경우와 같다고 보고 이 충격적인 양압력의 산정법을 제안하고 있다.

3. 반사율의 수리실험

3.1 실험 수조의 단면과 실험조건

본 실험에 사용된 수조는 부산대학교 공학대학 토목공학과 수리실험실의 수로로서 2차원 조파수조에서 실시했으며, 수조의 체원은 상기 그림과 같이 길이 24m 수조의 높이 1.2m, 수조의 폭0.6m 이다. 파압 수리모형 실험에 사용된 파랑조건은 <표 1>과 같다. 각 안벽 모형 부재에 걸리는 파압을 측정하기 위해서 최대 파랑 조건을 사용하고 있으므로 본 실험에서도 입사파를 $H_{max}=1.8 \times H_{1/3}$ 로 결정하였다.

표 1. 파압실험 조건

구분	파압측정내용	실험에 사용한 조위
실험조건	·파고 : $H_{max} = 1.8 \times H_{1/3} = 1.8 \times 2.7 = 4.86m$ ·주기 : $T_{1/3} = 10.14sec$	
CASE 1 (원안)	·pile파압 ·양압력	H.W.L M.W.L
CASE 2 (잔교)	·pile파압 ·양압력	H.W.L M.W.L

3.2 파압실험에 사용된 축척과 파압 측정기기 및 측정방법

파압을 측정하기 위하여 사용된 수리실험모델은 종류이고, 파압 실험에 사용된 기하학적 축척비의 범위는 1/10에서 1/50을 널리 이용하고 있으며, 본 실험에서는 1/50을 사용하였다. 이 값은 비교적 파압의 재현성을 나타내는 실내 수리실험에 사용하고 있는 값이다. 파압실험의 경우는 1/20혹은 1/30의 축척율이 비교적 많이 사용되고 있다. 파압 수리모형 실험에 사용된 파압계는 일본의 SSK 회사가 제작한 P306A-1 시리즈로서 비교적 감도가 우수한 제품으로 국내에서도 파압측정에 많이 이용되고 있다. 파압의 측정방법은 각 안벽구조물의 수리모형에 대하여 측정하고자 하는 위치에 파압센서를 부착시키고 파고를 발생시킨 후 정상적인 상태가 된 후의 20초간을 측정하였다. 측정된 자료는 AD변환기를 통해서 파압으로 변환시킨 후 컴퓨터에 저장되어 출력하도록 되어있다. 측정된 파압은 kgf/cm^2 을 kPa로 정리하였다.

4. 파압분석

4.1 중앙 및 전면경사 조향식 잔교에 대한 실험실태 분석방법

파압분석은 실험에서 실측한 값을 평균값과 최대값 으로 분류하였다.

조위 H.W.L. DL(+) 7.410m의 조위와 파고 4.86m의 경우는 파고가 상판의 천단까지 올라오는 현상을 보이고 있었다. 마치 월파가 발생하는 경우와 동일한 수리현상이 발생하고 있었다. 잔교 상판에 걸리는 양압력이 최대 153.57 kPa 값을 가지므로 잔교 식 안벽을 설치할 경우 양압력에 대한 검토가 필요하다. Pier에 걸리는 수평력은 정수면 상하로 하여 최대의 파압이 걸리고 있다. 경사Pier에 걸리는 수평력은 보다 큰 파압이 작용하고 있음을 알 수 있다. 따라서 경사말뚝을 설치할 경우는 잔교의 전면에 설치하는 것이 파압에 대해서 안정적이다.

4.2 잔교 식 안벽구조물의 파압

그림1은 수리모형실험에서 얻어진 자료를 조위별로 파압분포를 입체적으로 도시한 것이다. 이들 그림은 잔교 식 안벽으로서 상판(Apron)의 안쪽 끝 부분에 양압력이 크게 작용하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 양압력은 상판의 끝 부분으로 갈수록 큰 양압력이 분포하고 있음을 알 수 있다. 즉, 잔교 길이에 대한 잔교 상판에 작용하는 양압력이다. 그림에서 알 수 있듯이 잔교상판에 작용하는 양압력은 일정한 공간을 갖는 경우에 대하여 파고가 증가 할수록 양압력은 크게 측정되었다. 반사율도 비교적 적은 값으로 측정되었다.

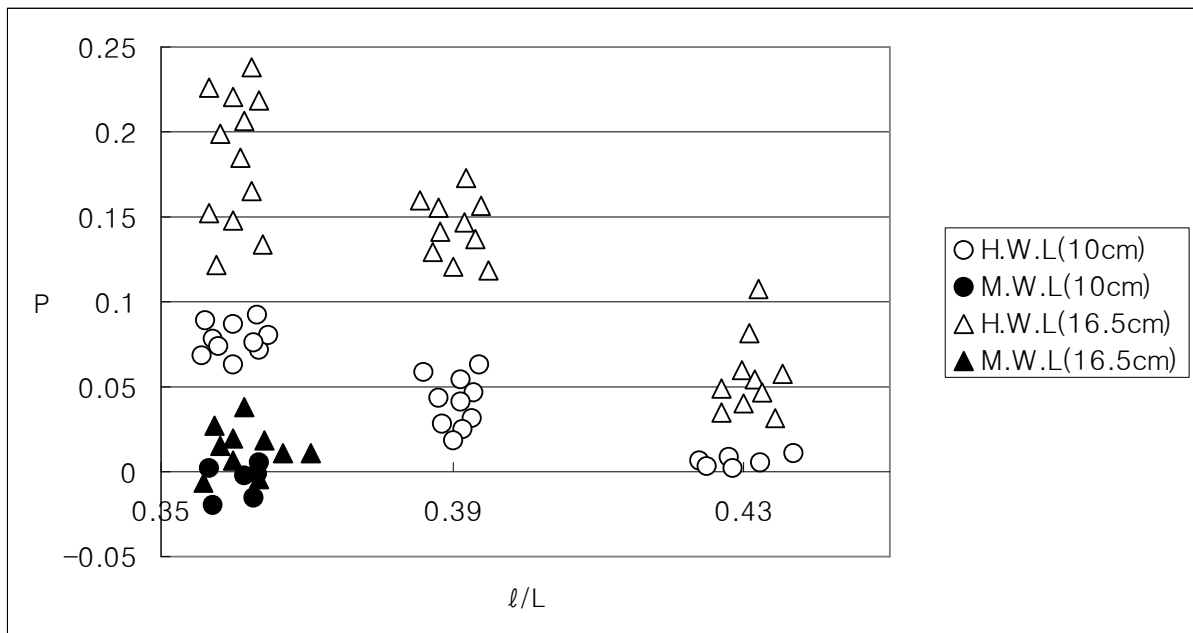


그림 1. 잔교길이에 대한 양압력 분포

4.3 부재별 상판의 양압력과 말뚝의 압축력(인발력) 분포

표 2는 경사말뚝과 수직말뚝 그리고 상판에 작용하는 파력을 정리한 것이다. 이표에 따르면 제1안의 경우는 수직말뚝이 경사말뚝보다 Offshore측에 있다. 동일 조건에서는 상판에 작용하는 양압력이 가장 크고, 수

직말뚝에 작용하는 수평력이 경사말뚝에 작용하는 수평력 보다 크게 측정되었다. 제2안의 경우는 제1안과 반대로 되어 있다. 이경우도 잔교상판에 작용하는 양압력이 가장 크고, 수직 말뚝과 수평말뚝에 작용하는 수평력은 거의 동일한 값을 보여주고 있다. 수직말뚝이 경사말뚝보다 수평력을 많이 받고 있어, 지금까지 알려진 수평력의 부담이 큰 경사말뚝이 안전하다는 이론과는 상반된 결과라고 할 수 있다.

그러나 본 연구에서 실시한 수리실험은 동일한 조건에서 제1안과 제2안의 말뚝의 위치가 달랐기 때문에 입사하여 들어오는 과정이 위치에 따라서 달라지므로 인해 발생된 파압이라고 생각된다. 항만 및 어항 설계기준에 의하면, 경사말뚝과 수직 말뚝으로 이루어진 구조물 기초에 작용하는 수평력은 모두 경사말뚝에 의해서 지지되는 것으로 해석하고 있다. 이 경우 경사말뚝에 작용하는 수평력은 각 경사말뚝의 축 방향 지지력에 의해서만 저항하는 것으로 설계를 할 수 있다고 언급하고 있다. 즉, 경사말뚝과 수직 말뚝을 혼합하여 동일기초에 수평력이 작용할 때, 동일 수평변위에 대하여 수직말뚝의 수평력 부담이 경사말뚝에 비하여 현저히 적으므로 안전한 설계를 위하여 수평력은 모두 경사말뚝으로 부담하는 것으로 계산한다. 양압력이 작용할 때는 표2는 각 부재에 발생하는 양압력을 정리한 것이다.

표 2. 각 부재에 작용하는 파력의 분포

구분	위치	H.W.L	M.W.L	L.W.L	분석
제 1안	수직Pier	56.50	44.10	-	상판 옥 측 최대 양압력 작용
	경사 Pier	29.50	49.10	-	
	상판(Apron)	79.90	17.70	-	
제 2안	수직Pier	57.30	40.20	-	상판 옥 측 최대 양압력 작용
	경사 Pier	58.60	40.70	-	
	상판(Apron)	59.60	9.21	-	

5. 결 론

본 수리모형실험을 통하여 잔교 식 안벽구조물에 대해 파압분포와 반사율을 정리하면 양압력은 아래와 같다. 양압력은 잔교상판에 순간적으로 발생되면서 상판을 상향으로 작용시키는 최대의 힘이다. 이들 힘에 의해서 직항(수직말뚝)이나, 사항(경사말뚝)의 안전에 큰 영향을 주고 있다. 이들의 영향이 말뚝의 압축력과 인발력에 어느 정도의 영향을 주고 있는가에 대해서는 수리실험을 통하여 계속적인 연구가 요구 된다.

잔교 식 안벽구조물이 반사율과 파압분포에 있어서 가장 적합한 안벽구조물임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 항만 및 어항 설계 기준 해양수산부 2005
2. Johnson, R.S.: The Effect of Air Compressibility in a First Approximation to the Ship Slamming Problem, Journal of Ship Research, pp57-68, March, 1968
3. Bagnold, M.R.A : Interim Report on Wave Pressure Research, Journal of Civil Eng. Vol. 12, pp201-230, 1939
4. 伊藤喜行, 竹田永章 : 棧橋に作用する波の揚壓力 港灣技術研究所報告 第 6 卷 4 號, pp37-63, 1967
5. Nagai and Gubo: 棧橋に作用する揚壓力に關する研究(第 1)第 13 回海岸工學講演會集, pp120-125, 1966
6. 谷本勝利, 高橋重雄 : 水平波に作用する揚壓力に關する研究 港灣技術研究所報告 第 17 卷 2 號, pp3-47, 1978