

Suction Pile기초 신형식방파제의 시험시공 A New Breakwater System with Suction Piles as Foundation

조영기¹, 정승진², 이지원³, 정두석⁴
Youngki Cho¹, Seungjin Jung², Jiwon Lee³ and Doosuk Jung⁴

1. 서 론

전통적인 방파제는 사다리꼴 모양의 기초사석 단면에 의해쪽으로 테트라포트와 같은 소파제가 설치된 경사식 방파제가 주를 이루었다. 그렇지만, 경사식 방파제는 수심이나 지지층이 깊어짐에 따라 방파제의 단면적이 급격히 증가하고 건설을 위하여 많은 양의 사석 골재가 요구되어 환경파괴 및 고가의 건설비 문제를 대두시켜 왔다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 비교적 설치 수심이 깊은 곳에서 콘크리트 케이슨식 방파제가 건설되어 왔다. 그러나 케이슨식 방파제도 연약지반의 층후가 두껍게 분포할 경우에는 상당한 고가의 건설비용이 들어가는 단점을 내포하고 있다. 따라서 이런 문제점들을 적절히 해결할 수 있는 능률적이고 효과적인 방파제 시스템의 개발이 요구된다.

본 논문은 연약지반의 층후가 두껍게 분포하는 대수심에 방파제를 효과적이고 경제적으로 건설할 수 있는 Suction Pile 기초를 이용한 신형식 방파제의 시험시공에 대한 소개를 목적으로 작성된 것이다. 현재 울산 신항에서 시험시공중인 신형식 방파제는 Suction Pile 기초에 중력식 콘크리트 케이슨이 상부에 위치한 형식을 취한다. Suction Pile을 굴착없이 지지력이 충분히 기대되는 지층까지 관입시켜 설치하고, 파랑을 제어

하기 위하여 콘크리트 케이슨을 상부에 설치함으로써 시공이 완료된다.

본 논문은 현장 조건, Suction Pile의 설계 및 시공, 그리고 신형식 방파제에 대한 소개를 포함한다.

2. Suction Pile 설치와 인발

Suction Pile은 그림 1과 같이 파일내부의 물을 배출시켜 파일내부의 압력이 저하되면 내부와 외부의 압력차로 관입되고, 물이 파일 내부로 주입되어 파일의 내부에 양압력이 발생되면 인발된다. Suction Pile의 설치를 지배하는 중요 인자로는 Suction압, 파일 내부와 외부의 압력차, 물의 유입 및 파일 관입으로 인한 지반의 교란, Sand Boiling, Clay Column Plugging 등이 있다. (Bang et al., 2000; Preber et al., 2001; Cho et al., 2002;)

Suction Pile 설치를 위한 가장 중요한 인자인 파일 내부와 외부의 압력차는 다음의 두 가지 한계값들에 의하여 지배된다.

Lower Bound: 압력차가 너무 작아서 관입력이 지반의 저항력을 극복하지 못하면 파일의 관입이 불가능하게 되는데, 파일이 지반의 저항력을 극복하여 관입하는데 필요한 최소한의 압력차를 Lower Bound라고 한다.

1 발표자: 대우건설 Suction Pile 책임 연구원

2 대우건설 토목기술팀

3 대우건설 상무

4 대우건설 토목기술팀 팀장

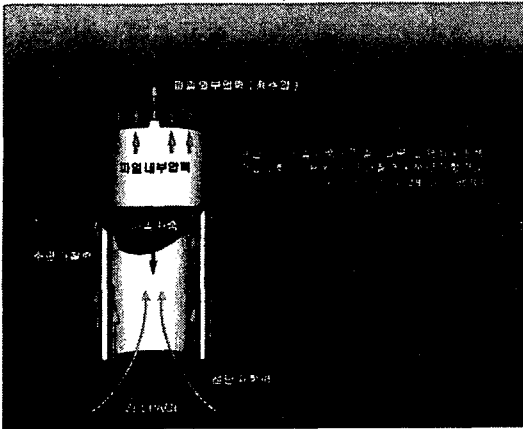


그림 1. Suction Pile 설치원리

Upper Bound: 압력차가 너무 크면, 모래층의 경우에는 파일 외부로부터 내부로 유입되는 급속한 물의 흐름으로 인하여 발생된 Uplift Seepage Force에 의하여 Boiling이 발생하고, 점토층의 경우에는 파일내부 전체의 점토 Column이 파일 하단부에서 절단(Soil Tension Failure) 되어 밀려 올라오는 Plugging 현상이 발생하게 된다. 어떤 경우든 파일 내부는 토사로 가득 차 더 이상의 파일 관입이 불가능하여 파일 설치에 실패하게 된다. 이에 해당하는 압력차를 Upper Bound라 한다.

설계 압력차는 그림 2에서 나타내는 것과 같이 Upper Bound와 Lower Bound의 사이의 값이다. 설치도중 관입 깊이에 따라서 설계압력도 연속적으로 변화하므로 Closed-Loop System으로 파일 내부와 외부의 압력차를 자동으로 조절하는 것이 요구된다.

3. 신형식방파제의 시험시공

3.1 현장조건 및 시험시공개요

Suction Pile 기초 신형식 방파제 시스템의 시험시공 위치는 현재 건설중인 울산 신항만에 계획된 외곽 방파제중 북방파제의 연장 50m 구간이다.

설계 조건은 수심 20~21m, 파고 6.4m, 주기 11초, 그리고 파장 148.07m이다. 해저지반은 보통 밀도의 실트질 모래위에 15m 정도의 연약 실트질 점토로 구성되어 있으며, 실트질 점토는 수분 함유량 56.3~95.4%, 비중 2.72~2.75, 액상한계

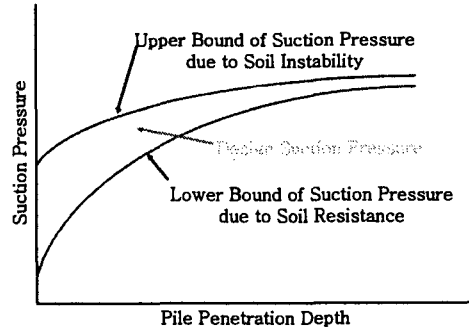


그림 2. Suction Pressure Control

91.4~94.3, 소성한계 30.2~31.2, 그리고 삼축 압밀 실험으로부터 측정된 비배수 전단 강도는 9.81~15.69kPa을 나타낸다. 실트질 모래는 단위중량 2.65, 간극비 0.63~0.70, 함수비 23.8~26.4%, 포화 단위중량 19.61kN/m³, 그리고 상부에서는 34°, 바닥에서는 38°의 내부 마찰각을 가진다.

이러한 현장조건에 기존의 사석기초 방파제가 건설된다면, 사석 기초는 실트질 모래층의 상부가 지지층이기 때문에 필요한 방파제의 기초를 형성하기 위해서는 사석 기초 단면폭이 100m 이상이 되어야 할 것이다. 이에 반해 Suction Pile을 이용한 신형식 방파제는 외경 11m, 벽두께 55cm의 두개의 콘크리트 Suction Pile을 한 줄로 사용하므로 기초의 폭이 획기적으로 줄어들게 된다. 각각의 Suction Pile은 그림 4에서 나타내는 것과 같이 상부 치수가 13.9m×13.9m인 사각 콘크리트 슬래브로 래벨링 사석을 위한 3m 높이의 연직 플랜지가 양쪽 끝에 세로 방향으로 설치된다.

Suction Pile 기초 신형식 방파제의 시험시공은 Suction Pile의 설치가 완료되면 콘크리트 슬래브 상부와 플랜지 사이에 2m 두께의 래벨링 사석을 정지하고, 그 위에 5000ton 규모의 상부 콘크리트 케이슨이 거치되게 된다. 네 개의 Suction Pile이 하나의 상부 콘크리트 케이슨을 지지하게 된다. Suction Pile은 필요한 지지력을 확보하기 위하여 연약 점토층을 관통하고 하부 모래층 일부도 관입하게 된다.

3.2 Suction Pile 현장 설치

Suction Pile의 중량은 1200~1600ton 정도이고 그림 5에 보여지는 1800톤급 바지크레인(길이



그림 4. 석션파일 제작현황

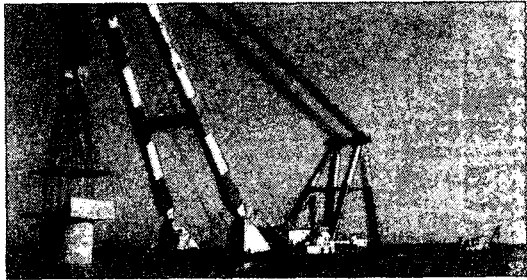


그림 5. Suction Pile 운반

80m, 폭27m, 수심6m, 흘수5.2m)에 의해 운송 및 설치된다. 설치현장에서는 바지선에 장착되어 있는 다섯 개의 Drag 앵커를 이용하여 위치를 고정하고, 크레인에 설치된 두 개의 GPS 탐지기를 이용하여 Suction Pile이 설치될 위치를 조정한다. 바지크레인의 실시간 궤적은 통제실에 있는 두 개의 GPS 탐지기와 연결된 휴대용 컴퓨터로 실시간으로 모니터링하게 된다. Suction Pile 설치를 위하여 Suction Pile 상단 슬래브에는 4개의 분당 3m³용량의 원심펌프가 부착되어 있다.

Suction Pile의 설치는 그림 6에서 나타난 바와 같이 콘크리트 슬래브의 상부를 수면근처까지 가라앉힌 후 크레인의 위치 및 방향을 조절하여 Suction Pile 위치를 보정한다.

파일의 위치 보정이 완료되면, 파일을 해저면으로 천천히 내려서 파일 설치작업이 이루어지는데 파일은 자중에 의하여 파일 길이의 2/3 정도 관입할 것으로 이론적으로 계산되었다. 설치당시 파일 내부의 압력 변화로 추정된 Suction Pile의 자중 관입은 이론적 추정값에 근접한 것으로 확인되었다. Suction Pile 자중 관입이 완료되면 파일에 부착된 펌프가 파일 내부에 Suction압을 발생시켜 추가적으로 관입시키게 된다.

Suction Pile의 설치 시작과 동시에 지속적인

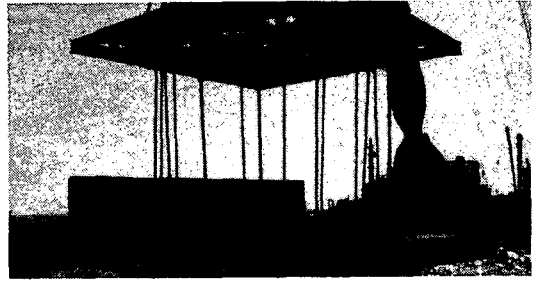


그림 6. 석션파일 설치

모니터링을 통하여 파일 내부에 Sand Boiling이나 Clay Column Plugging과 같은 현상이 발생하지 않도록 Suction압을 적절히 조절하여야 한다. 안정적으로 적용될 수 있는 석션압의 크기는 Upper Bound와 Lower Bound에 의하여 결정된다. 석션압의 Lower Bound는 파일 관입에 대응하는 지내력에 의해 알 수 있으며, 만약 석션압이 이 값보다 작다면 관입이 불가능해진다. 반대로 석션압이 Upper Bound보다 크면 파일 내부의 토사가 불안정하게 되어 파일 설치에 실패하게 된다.

Suction Pile의 시험시공시 파일 내부와 외부의 간극수압, 관입깊이, 파일의 경사도 측정은 0.06초 간격으로 자기계측기에 의해 이루어졌으며, 간극 수압계는 파일의 상단부에 같은 높이로 내부와 외부에 설치하여 외부의 변화에 영향없이 압력차를 측정할 수 있게 하였다. 파일 관입깊이는 주로 초음파장치에 의해 측정되고, 수압측정에 의해 검증된다.

Suction Pile의 관입깊이와 최종위치는 파일의 주위를 따라 세 개의 다른 장소에서 다이버들에 의해 직접 측정되었다.

설치동안의 Suction Pile 기울기는 파일의 상부에 연직방향으로 부착된 두 개의 경사계를 사용하여 측정함으로써 임의방향에 대한 파일의 최대 경사를 측정할 수 있었다. 그 외에도 Suction Pile 선단부에 토압계를 설치하여 토압의 변화를 모니터링 하였다.

지지력 시험은 파일이 완전히 설치된 후 파일 내부의 압력을 순간적으로 떨어뜨려 Suction압을 최대한 증가시켜 수행하였다.

4. 결 론

Suction Pile을 이용하여 기초를 처리하고 중

력식 콘크리트 케이슨을 상부구조물로 활용하는 새로운 형식의 방파제 시스템이 실제 현장에서 시험시공을 하고 있으며, 기초인 8개의 Suction Pile이 성공적으로 설치되었다. 향후 파일과 케이슨 사이의 사석 정지작업 후 상부 케이슨을 거치하고 상치 콘크리트를 타설하면 신형식방파제의 시험시공이 완료되게 된다.

이처럼 연약지반의 기초 처리시 부유물질의 발생이 없어 환경친화적이고 시공속도가 빠르며 무엇보다도 깊은 수심의 두꺼운 연약지반일 경우 비용절감 효과가 기대되는 Suction Pile을 이용한 신형식 방파제가 가까운 미래에 널리 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- Cho, Y., Bang, S., Kanorski, SR., and Taylor, RJ. (2002). Field Validation of Soil Friction Transition During Suction Pile Installation. *Int J of Offshore and Polar Eng.*, Vol. 12, No 4, pp311-315.
- Cho, Y., Bang, S., and Preber, T., (2002). Transition of Soil Friction During Suction Pile Installation. *Canadian Geotechnical J*, Vol. 39, No 5, pp1118-1125.
- Bang, S., Preber, T., Cho, Y., Thomason, J., Karnoski, SR., and Taylor, RJ., (2000). Suction Piles for Mooring of Mobile Offshore Bases. *J of Marine Structures (ELSEVIER)*, No 13, pp 367-382.
- Preber, T., Bang, S., Cho, Y., Boyle, S., and Gould, J., (2000). Calibration of Suction Pile Installation Analysis in Sand. *53rd Canadian Geotechnical Conf.*, Montreal, Canada, Oct, pp 901-908.
- Bang, S., Cho, Y., Kanorski, S., and Taylor, RJ., (2000). Field Verification of Suction Pile Installation in Sand. *Int Symp on Coastal Geotechnical Eng. in Practice*, Yokohama, Japan, pp. 249-254.