한국지반공학회논문집 제36권 12호 2020년 12월 pp. 35 ~ 43
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.36, No.12, December 2020 pp. 35 ~ 43

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2020.36.12.35

현장 실험을 통한 원형강관 석션관입성 검토

Suction Penetration Review of Circular Steel Pipes by Field Test

김 현 주[1] Kim, Hyun-Joo
최 진 오[2] Choi, Jin-O

Abstract

Currently, cofferdams of circular cross section are widely applied as temporary facilities for the installation of bridge foundations in river/sea bridge construction in Korea. Existing caisson, sheet pile, and cell type cofferdam are widely used, but these methods take a lot of time and cost for installation and dismantling. In the case of the existing sheet pile construction method, attention is needed to secure internal and external stability because of the damage to the sheet pile due to ground penetration and difficulty in connecting element members. In this study, penetration design of circular steel pipes using suction pressure was performed on the soft ground of the west coast, and it was confirmed that penetration construction using suction pressure was possible through field tests. It was confirmed that applying the ground analysis results using the cone penetration test (CPT) to the design rather than the standard penetration test (N value) results more similar to the field test results. In addition, it was confirmed that local failure of the inside of the cofferdam was induced when a suction pressure higher than the upper limit suction pressure was applied in the silty sand.

요 지

현재 국내에서 하천/해상 교량 공사시 교량기초 설치를 위한 가시설로서 원형 단면의 가물막이(cofferdam)를 많이 적용하고 있다. 기존 케이슨(caisson), 시트파일(sheet pile), 셀(cell) 식 등의 가물막이 공법이 많이 활용되고 있으나 이러한 공법은 설치 및 해체시 많은 시간과 비용이 소요된다. 해상공사에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 시트파일 공법의 경우 지반 관입에 의한 시트파일 손상과 요소 부재 연결 작업의 어려움으로 내적 및 외적 안정성 확보를 위해 주의가 필요하다. 본 연구에서는 서해안 연약지반을 대상으로 원형강관의 석션관입성 설계를 수행하였고, 현장 실험을 통하여 원형강관 석션관입 시공이 가능한 것을 확인하였다. 그리고 표준관입시험(N치) 결과보다 콘관입시험(CPTu)을 이용한 지반 분석 결과를 설계에 적용하는 것이 현장 실험 결과와 보다 유사한 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 또한 실트질 사질토 지반에서 상한석션압 이상의 석션압을 적용시 가물막이 내부의 국부적인 파괴(piping 현상)를 유발하는 것을 확인하였다.

Keywords : Circular steel pipe, Cofferdam, Con penetration test, Field test, Poor subsoil, Suction pressure

1 정회원, (주)이피에스엔지니어링 부장 (Member, General Manager, EPS Engrg. Co., Ltd., Tel: +82-31-347-2063, Fax: +82-31-347-2231, bestcivil@epseng.com, Corresponding author, 교신저자)
2 정회원, (주)이피에스엔지니어링 사장 (Member, President (Ph.D), EPS Engrg. Co., Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2020 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

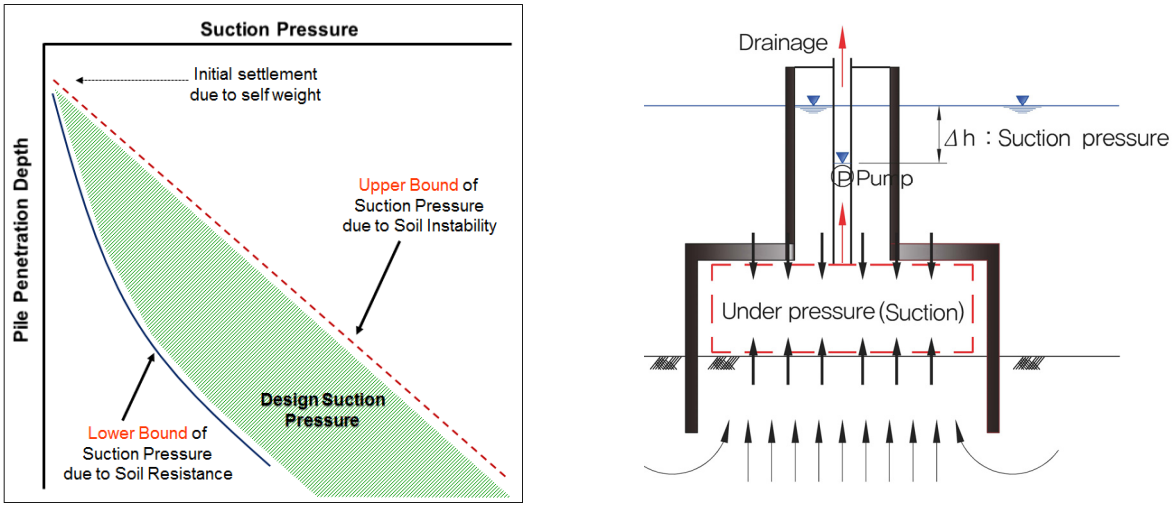
1. 서 론

해상교량 공사시 공사비 절감 및 시공성 향상을 위해 원통형 가물막이에 흙채움을 하여 작업공간으로 이용하는 경우가 있다. 또한, 육상에서 초고층 구조물 시공을 위해 정밀시공 및 내부 지보재 최소화를 통한 작업공간 확보를 위해 적용하는 사례도 있다. 구조적으로 원형 단면은 단면에 발생하는 아칭효과(arching effect)로 인하여 벽체에 작용하는 토압이 감소하는 장점 있어 유리하다(Szechy, 1996). 이와 같은 이유로 하천/하상 교량 공사시 교량기초 설치를 위한 가시설로서 원형 단면의 가물막이(cofferdam)를 많이 적용하고 있다. 하천이나 하상에서 이루어지는 공사들의 경우 공사비가 고가로서 경제적인 시공을 위해서는 합리적인 설계가 필요하다. 기존 가물막이 공법은 설치 및 해체시 많은 시간과 비용이 소요되며 전체 공기와 공사비를 증가시키는 주요한 원인이 된다. 해상공사에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 시트파일 공법의 경우 지반 관입에 의한 시트파일 손상과 요소 부재 연결 작업의 어려움으로 내적 및 외적 안정성 확보에 많은 주의를 기울여야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 경제성 및 안정성 확보가 용이한 원형강관 가물막이 공법이 제안되었다(KAIA, 2015). 원형강관 가물막이 공법은 석션압을 이용하여 신속한 설치가 가능하고, 여러 개의 원형강관 세그먼트(segment)로 분절될 수 있어 각 부재의 무게를 최소화하여 시공에 유리하며, 원형의 단일 부재로 이루어져 구조적으로 안정적이며, 그리고 가물막이 사용 후 석션압을 역으로 작용시켜 해체가 용이한 장점이 있다.

석션(suction) 기초란 기초내의 물을 강제배수시킬 때 발생하는 기초 내외의 수압차를 이용하여 해저지반 속에 침설한 기초를 말한다. 석션기초 구조물이란 석션기초를 이용한 구조물을 총칭하며, 설계 석션압의 개념 및 석션압 작용 개념도는 Fig. 1과 같다.

Steensen-Bach(1992)는 사질토와 점성토 지반에서의 석션기초의 모델 시험에 관하여 자세히 설명하였으며, 버켓기초가 석션압으로 관입시 버켓기초와 주변지반과의 상호역학관계를 통해 관입성 평가에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 지속적으로 수행되었다(Bang et al., 2000; Houlsby &Byrne, 2005; Tran & Randolph, 2008; Senders & Randolph, 2009). 그리고, Kim (2019)과 Kim et al. (2019)는 석션 시공시 원형강관 가물막이에 작용하는 하중 특성 및 구조 안정성을 검토하였다.

본 연구에서는 기존 인근 시공현장의 표준관입시험 지반조사 자료와 현장 실험(pilot test)부지에서 표준관입시험, 콘관입시험 및 투수시험을 추가 수행한 시험 결과 값을 구분한 각각의 지반조사 결과를 이용하여 석션압 산정 및 관입성 평가를 수행하였다. 이 산정 결과를 현장 실증실험을 통하여 석션 관입성을 검증하고자 하였으며, 실험 현장은 군산 새만금 내항으로 2개의 상·하부 세그먼트로 구성된 직경(D) 5m, 수직 벽체 두께(thk.) 25mm인 원형강관을 제작하여 적용하였다. 본 연구는 해상 교량기초 대형원형강관 가설공법 개발 연구과제 중 일부인 석션을 이용한 관입성 설계 부분에 대한 부분으로 검증을 하고자 하였다.



(a) Concept of design suction pressure

(b) Concept of suction pressure action

Fig. 1. Concept and action of suction pressure

2. 현장 설계 지반 조건 및 원형강관 가물막이 제원

2.1 지반 조건 및 지반 강도 정수

현장 실험 시공은 새만금 남북도로(x공구) 인근 내항에서 수행되었으며, 석션관입성 평가를 위한 설계에 적용된 기존 지반조사 자료 역시 새만금 남북도로(x공구)에서 수행한 표준관입시험과 제시한 지반강도 정수를 분석한 자료를 적용하였다. 추가적으로 기존 지반조사 자료의 적용에 대한 타당성과 보다 정확한 설계 평가를 위해 원형강관 석션가물막이 현장 실험시공이 이루어지는 정위치에서 약 30m 이격된 위치에서 표준관입시험(SPT), 정적콘관입시험(CPT) 및 투수시험을 각 1회 실시하였다. 추가한 지반조사 결과를 적용하여 설계 검토를 재수행하여 기존 표준관입시험 자료만으로 설계 검토한 결과와 비교하여 석션관입성을 검증할 수 있도록 하였다.

원형가물막이의 현장 실험시공 검증을 위한 설계 조건으로 직경 5m 원형강관 가물막이의 석션을 이용한 목표 관입심도는 5m로 설정(가정)하여 설계하였다. 새만금 남북도로(x공구)에서 수행한 표준관입시험 자료를 바탕으로 목표관입 심도까지의 현장 지층 조건은 매립층(실트질 사질토)으로 원형가물막이 선단의 N값은 17을 적용하여 설계에 적용하였다. 새만금 남북도로(x공구) 지층 조건 및 지반 강도 정수는 Table 1과 같으며, 현장 실험 위치에서 시추 조사(SPT, CPT, 그리고 현장 투수시험)한 지반 강도 정수 및 지층 특성은 Table 2, Fig. 2와 같다. SPT를 통해 도출한 내부마찰각은 모래의 상태에 따른 N값과 마찰각의 관계식(Dunham, 1954)을 통해 도출하였고, CPT 시추조사에 따른 내부마찰각은 다음 식 (1)에 의해 도출된 값으로 상이하게 적용하였다.

Fig. 3은 대형토조시험을 통하여 지지력 계수와 마찰각 관계(Robertson and Campanella, 1983)를 나타내는 것으로, 다음 식 (1)과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\varphi = \tan^{-1}[0.1 + 0.38\log(\frac{q_c}{\sigma'})] \quad (1)$$

여기서, φ : 콘관입 시험을 통한 내부마찰각
q_c : 콘관입 선단저항치(kN/m^2)
σ' : 지점에서의 유효응력(kN/m^2)

추가 표준관입시험 결과 현장 지층 조건은 실트질 사질토 지반으로 N값은 기존 인근 자료와 비교적 유사한 경향을 보였으나, 콘관입시험을 통해 심도 9m(굴착 후 현장 실험 조건 상대 심도 5m) 부근의 내부마찰각(Robertson and Campanella, 1983)은 φ=39°로 표준관입시험을 통한 결과값 보다 크게 증가한 것으로 산출되었다. 이것을 통해 표준관입시험 N값을 기준을 지반 강도정수(내부마찰각) 산정한 결과와 콘관입시험을 통한 지반 강도 특성을 비교한다면 표준관입시험 결과가 해당 지층 특성을 다소 과소평가할 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 1. Geotechnical properties using the results of in-situ test nearby sites

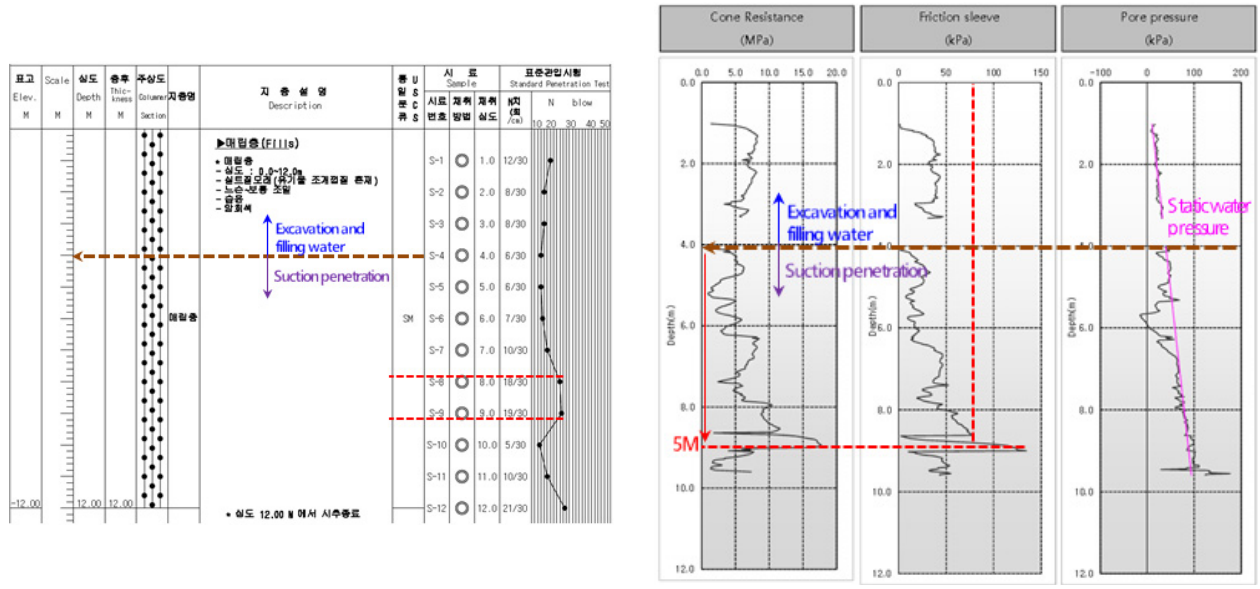
Division	Depth (m)	Avg. N-value	Unit weight (kN/m^3)	Internal friction angle (°)	Cohesion (kPa)	Poisson ratio (ν)	Permeability (cm/s)
Silty Sand (N>10)	0-6.0 (0-1.0)*	9	18.5	26	0.00	0.39	1.6×10^{-3}
Silty Sand (N≤10)	6.0-12 (1.0-8.5)*	17	19.0	29	0.00	0.38	1.3×10^{-3}

(*) Depth relative to the base of the test pit

Table 2. Geotechnical properties of the site estimated from the in-situ tests

Division	Depth (m)	Avg. N-value	Unit weight (kN/m^3)	Internal friction angle (°)	Cohesion (kPa)	Poisson ratio (ν)	Permeability (cm/s)
Silty Sand (N>10)	0-8.0 (0-3.0)*	8	18.5	30	0.00	0.39	1.2×10^{-4}
Silty Sand (N≤10)	8.0-12 (3.0-7.0)*	18	19.0	39	0.00	0.38	2.7×10^{-5}

(*) depth relative to the base of the test pit



(a) Result of SPT (b) Result of CPT

Fig. 2. Boring logs and CPT profiles

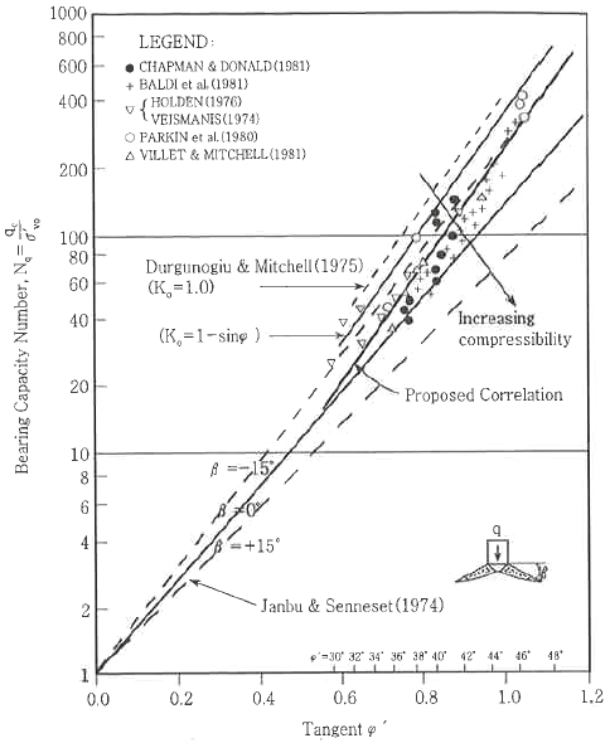


Fig. 3. Relationship between bearing force coefficient and friction angle in large calibration soil test (Robertson and Campanella, 1983)

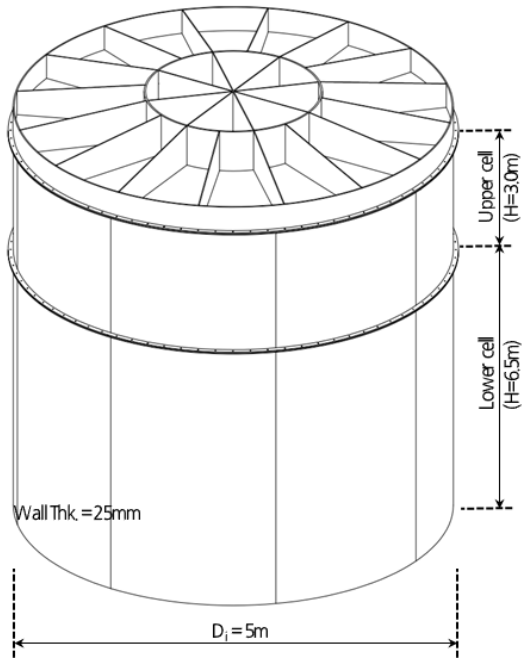


Fig. 4. Schematic diagram steel pipe cofferdam for filed test

2.2 원형강관 가물막이 제원

현장 시험을 위한 원형강관 가물막이에 적용된 재질은 SM490 강재이며, Fig. 4와 같이 내경(D_i)이 5m, 원형강관의 수직 벽체 두께(Thk.)는 25mm, 높이(H)가 9.5m로 현장 시공성을 고려하여 하부와 상부로 분리될 수 있는 구분형 원형강관으로 제작 되어졌다. 자중침하에 적용된 원형강관의 설계 중량은 각각 하부강관(H=6.5m)+상판은 30.0tf(Case1), 하부강관+상부강관(H=3.0m)+상판은 43.0tf(Case2) 적용하였다. 하부강관 높이(H)가 6.5m, 상부강관 높이(H) 3m 길이로 각 강관의 이음부는 플랜지(flange)와 볼트(bolt)로 체결하도록 제작되어 졌으며, 원형강관 상판(cap) 역시 상부강관과 볼트로 체결되도록

구성 되어졌다. 원형강관 가물막이에 대한 구조적인 검토에 대한 상세한 내용은 Kim(2019)와 Kim et al.(2019)을 참조할 수 있다.

3. 원형강관 석션 관입성 검토

본 연구에서 석션 설계 방법은 일본 연안개발기술연구센터(Coastal Development Institute of Technology)에서 제시한 석션기초구조물 기술매뉴얼(2003)을 바탕으로 설계 검토를 진행하였다. 이를 통하여 설계 석션압을 산정하였고, 현장 시험을 통해서 석션관입성을 평가하기 위한 방안으로 현장 실험 시공 전 제작된 원형가물막이 벽체의 내부와 외부에 각각 2개의 간극수압계를 설치하여 강관 내·외부에 작용하는 수압의 차이로 내부에 작용하는 석션압을 실시간 확인할 수 있도록 준비하였다. 현장 계측 데이터를 활용하여 설계 검토된 석션압과 현장 실험시 작용하는 석션압의 관계를 비교·검토할 수 있도록 하였다.

3.1 설계 석션압 산정

석션압 산정은 새만금 남북도로(x공구)에 적용한 지층 조건(Table 1)을 적용하였고, 사질토 지반의 상한석션압 산정식은 식 (2)와 같으며, 기초내에 발생하는 석션압(p_s)는 식 (3)과 같다.

$$p_{sc} = \frac{1}{F}(d_f + \delta_i)\gamma' \frac{1}{1 - p_t/p_s} \quad (2)$$

여기서, F : 안전율($F \geq 1.0$)
γ' : 흙의 수중 단위체적중량(kN/m^3)
d_f : 침설길이(m)
δ_i : 기초내부의 지반의 융기(隆起) 높이(m)
p_s : 기초상판부의 석션압(kN/m^2)
p_t : 기초선단부의 석션압(kN/m^2)

$$p_s = h_s \cdot \gamma_w \quad (3)$$

여기서, p_s : 석션압(kN/m^3)
h_s : 기초 내외의 수위차(m)
γ_w : 물의 단위체적중량(kN/m^3, 해수는 10.1 kN/m^3)

석션기초가 침설 가능하기 위해서는 침설 초기의 관입저항(소요석션압)이 상한석션압 이하여야 한다. 석션기초 자중침하량 산정방법은 석션압을 “0”으로 하고 침설에 대한 관입력(F_D)/관입저항력(F_R)이 1.0이상이 되도록 침설깊이를 변화시켜가며 계산하여 산정한다. 상기 방법을 통하여 기존 인근 자료를 이용하여 산정한 자중침하량은 Case1 일 경우 1.0m, Case2 일 경우 1.5m 이며, 그리고 단계별 상한석션압과 설계석션압은 Table 3과 같다. 석션 파일에서 초기 작용 석션압에 의해 사질토 지반에서는 파이핑(piping), 연약 점토 지반에서는 히빙(heaving) 발생으로 지반 파괴가 발생할 수 있으므로 충분한 자중 침하량을 확보하는 것이 필요하다. 검토 결과 관입 깊이에 따라 석션압은 증가하였으며, 이것은 원형강관이 지반에 관입되기 위해 필요로 하는 석션관입력이 깊이에 따라 증가하는 것을 의미한다. 결국 석션관입은 원형강관에 작용하는 석션관입력이 관입저항력(선단저항력과 주면마찰력의 합)보다 커야 가능한 것을 의미하며, 관입저항력은 관입깊이가 깊어질수록 발생하는 관입저항력이 커지기 때문이다. 추가 시추조사한 콘관입시험 결과를 반영한 심도 3.5m 이하 구간(기존 내부마찰각(Φ) 26°, 추가조사 적용 후 적용 내부마찰각(Φ) 30°)까지는 동일하게 석션압이 산정되었으며, 심도 3.5m 이상 구간(기존 내부마찰각(Φ) 29°, 추가조사 적용 후

Table 3. Calculation of design suction pressure (Applied to “Table 1”)

Division	Depth (m)	Upper bound of suction pressure	Design bound of suction pressure	Note
Silty sand	0.0~1.5	Self-weight Settlement	-	at. Case1 : 1.0m at. Case2 : 1.5m
	1.5	21.1kPa	14.8kPa	
	2.0	26.6kPa	18.6kPa	
	3.0	36.7kPa	25.7kPa	
	4.0	46.2kPa	32.4kPa	
	5.0	55.6kPa	38.9kPa	

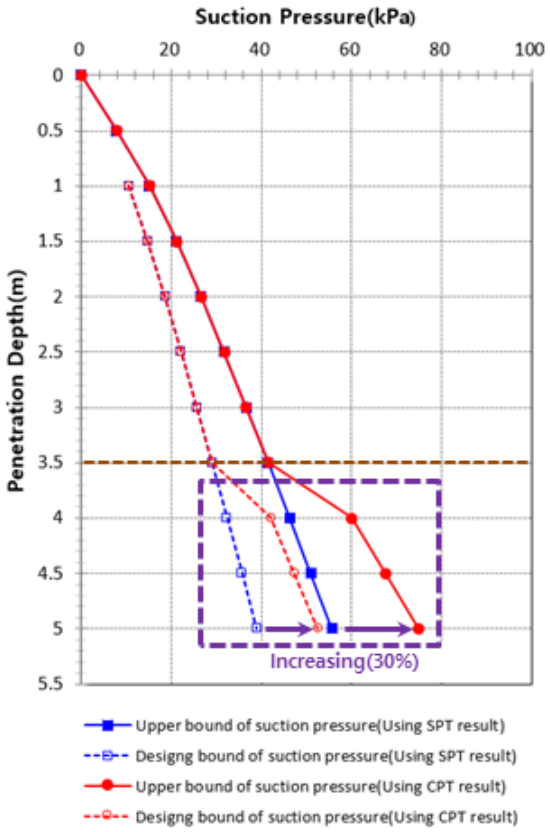


Fig. 5. Comparison of suction pressure according to ground investigation results

적용 내부마찰각(Φ) 39°)에서는 석션압이 약 30% 증가한 것으로 검토(Fig. 5)되었다. 이와 같은 석션압 산정을 통하여 현장 실험 시공시 간극수압계를 통한 계측결과를 활용하여 작용 석션압을 확인할 수 있도록 하였으며, Fig. 6과 같은 형태로 관입 심도에 따라 석션압을 증대시켜 시공시 석션압 관리를 할 수 있다.

3.2 현장 실험 시공시 계측 및 결과 고찰

앞서 언급하였듯이 본 연구에서 기존 조사된 파일럿 테스트 인근 지층 특성(Table 1)을 이용하여 석션압을 예측하였고, 파일럿 테스트 부지에서 추가 현장 시추 조사를 수행하여 콘관입시험(CPT) 결과를 반영한 결과(Table 2)를 이용하여 석션압 재산정을 통한 상한 석션압 산정 검토 결과는 다음 Table 4와 같다. 현장 파일럿 테스트 실험시 간극수압계 계측 결과를 이용한 석션압 산정은 원형강관 벽체의 내·외부에 설치한 간극수압계에서 계측된 내·외부 계측 데이터의 차이를 작용 석션압으로 도출하였다. 원형강관 구체 높이(H) 6.5m(Case1) 2회, 구체 높이(H) 9.5m(Case2) 2회 각각 수행하여 계측(Measurement 1~4)하였다.

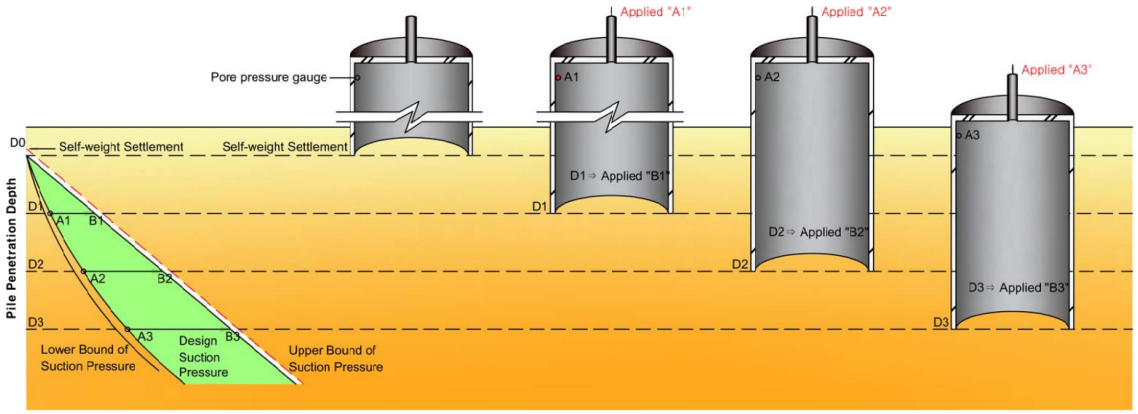


Fig. 6. Suction pressure increases with increasing penetration depth

Table 4. Suction pressure review according to "Table 1 & Table 2" and field measurement results

Division	Depth (m)	Upper bound of suction pressure (Design)		Suction pressure according to field measurement results			
		Applied to Table 1	Applied to Table 2	Measurement 1	Measurement 2	Measurement 3	Measurement 4
Silty sand	0.0~1.0	Self-weight settlement		Self-weight settlement		Self-weight settlement	
	1.0			6.7kPa	3.7kPa		
	1.5	21.1kPa	21.1kPa	12.4kPa	13.0kPa	1.0kPa	3.0kPa
	2.0	26.6kPa	26.6kPa	23.2kPa	14.4kPa	5.8kPa	11.8kPa
	3.0	36.7kPa	36.7kPa	32.2kPa	35.1kPa	19.5kPa	25.1kPa
	4.0	46.2kPa	60.1kPa	46.0kPa	45.8kPa	29.3kPa	51.1kPa
	5.0	55.6kPa	75.0kPa	70.6kPa	71.3kPa	65.1kPa	63.0kPa

현장 지반조사를 통한 추가한 지반조사 결과(Fig. 2)를 검토해보면 콘(cone) 저항값이 심도 4m 부근이상에서 증가하여 심도 4.5m 부근에서 급격하게 증가하는 것으로 확인되었다. 이는 현장 파일럿 테스트 실험을 통해 도출한 계측값(석션압)을 확인하였을 때, 지반조사 자료을 이용하여 각각 산정한 상한 석션압과 비교하면 심도 4m 이하 구간에서는 상한 석션압 이하의 범위에서 근입하는 것을 확인할 수 있고, 4m 이상 구간에서는 현장 실험 계측값은 콘관입시험 결과로 산출한 상한석션압과 유사하게 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 콘관입시험 결과 선단저항력과 주면저항력이 급격히 증가하는 심도 4.5m 부근에서 계측된 석션압이 상한석션압 이상으로 계측 되는 경우도 Fig. 7과 같이 확인할 수 있었다.

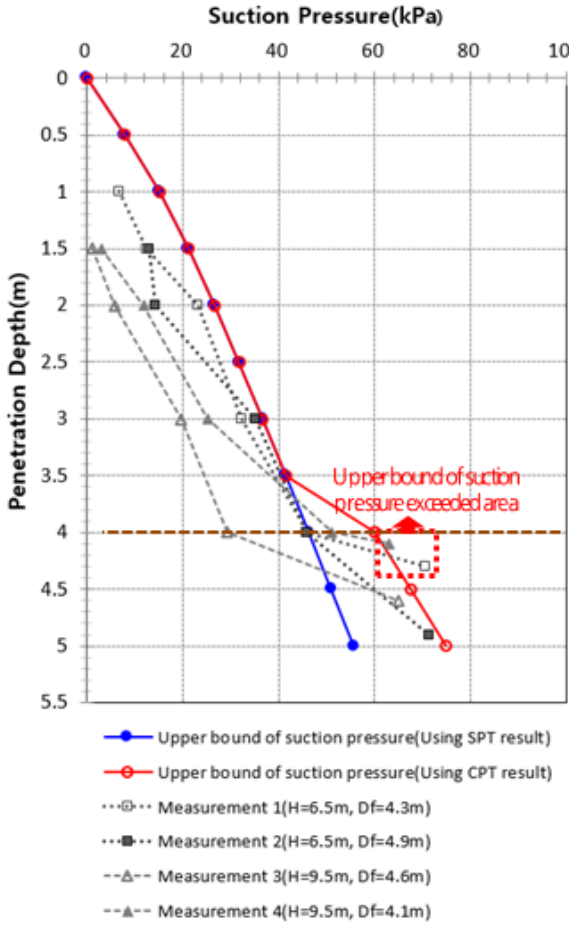


Fig. 7. Suction pressure by depth of penetration according to “Table 1 & Table 2” and field measurement results

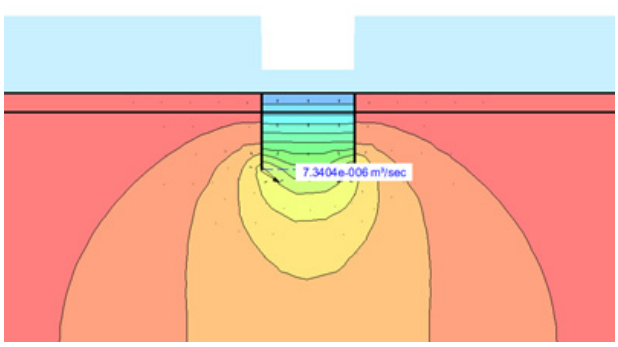
원형강관 설치 후 강관 내부의 물을 펌프로 배출하여 확인한 결과 Fig. 8(b)와 같이 국부적인 파이핑(piping) 흔적을 확인할 수 있었다. 이는 추가적인 관입 여부를 확인하기 위해 상한 석션압 이상의 압력을 일정 시간 이상 가하였을 때 콘관입시험 결과에서 확인하였듯이 지반의 강도가 크게 발현되는 심도 4.5m 부근에서는 추가적인 석션 관입이 원활하게 이루어지지 않고 원형강관 내부 취약한 곳으로 작용 석션압이 집중하여 국부적인 파괴가 발생된 것으로 판단되었다. 상기와 같이 석션압 평가를 N치와 CPT 결과를 이용하여 비교·분석 하였을 때, CPT 결과를 적용하는 것이 현장 실험 계측결과와 유사한 경향을 나타내는 것으로 볼 수 있으며 CPT 결과 이용한 설계가 보다 유용하다고 판단되었다.

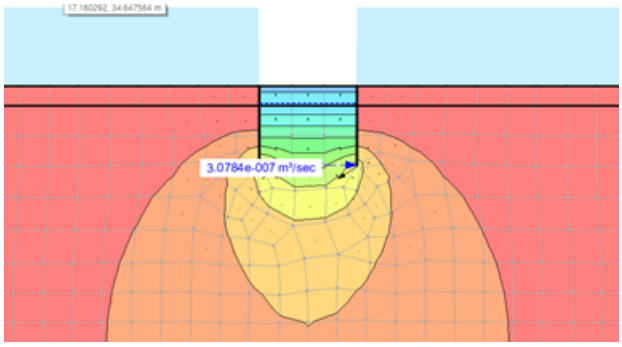
추가적으로 지층 특성 조건(Table 1)을 반영하여 심도 4m 지점을 기준으로 설계석션압 32.4kPa 적용시와 이 지점에서 상한석션압 이상의 석션압 51.1kPa 적용하여 침투류(Seepage, GeoStudio 2012) 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 작용 석션압은 양정고와 압력을 원형강관 내외측의 수두차로 환산하여 적용하였다. 검토 결과(Fig. 9) 설계석션압을 적용하였을 때 파이핑에 대해

(a) The steel pipe cofferdam installation using suction

(b) Inside the steel pipe cofferdam

Fig. 8. The steel pipe cofferdam during and after installation





Critical hydraulic gradient (i_{cr})	1.10	Critical hydraulic gradient (i_{cr})	1.10
Outlet hydraulic gradient (i_{exit})	0.652	Outlet hydraulic gradient (i_{exit})	1.121
Result	F.S=1.69 > 1.5 ⇒ O.K	Result	F.S=0.98 < 1.5 ⇒ N.G
Q (m^3/min)	1.73E-03	Q (m^3/min)	7.25E-05

(a) Design suction pressure 32.4kPa applied at 4m depth (b) Suction pressure 51.1kPa applied at 4m depth

Fig. 9. Seep/W analysis result (Applied to "Table 1")

안전한 것으로 검토 되었지만, 상한석션압 이상의 석션압을 적용하였을 때 영구구조물 안전 기준율(F.S≥1.5)를 기준으로 파이핑에 대해 불안전한 것으로 검토 되었다. 이는 앞서 언급하였던 Fig. 8(b)와 같이 상한석션압 이상의 석션압 적용시 국부적인 파괴가 발생 할 수 있는 것을 확인할 수 있는 자료였으며, 작용 석션압에 의해 과도한 침투수류는 지반을 교란시켜 원지반을 느슨하게 하고, 원형강관이 목표 깊이까지 설치되는 것을 저해시키는 원인이 되므로 지반에 과도한 석션압이 작용하지 않도록 하는 것이 석션을 이용한 시공시 요구되는 부분이다(Senpere and Auvergne, 1982; Tjelta, 1995; Kim et al., 2018).

4. 결 론

본 연구에서는 원형강관 가물막이의 석션을 이용한 설치 시공에 대한 검증을 하기 위해 현장 실험시공을 새만금 남북도로(x공구) 인근 내항에서 석션 관입 5m 시험을 수행하였다. 이를 위해 현장 지반 조건을 고려하여 직경이 5m인 원형강관 가물막이에 대한 석션압을 산정하였고, 원형가물막이의 석션을 이용한 현장 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다.

(1) 현장 인근 설계 자료를 이용하여 제시한 석션압을 적용하였을 때, 원형강관 가물막이의 목표 근입 심도 약 4.5~5m 인근까지는 설계한 상한석션압을 적용하여 관입이 가능한 것을 확인하였다.

(2) 콘관입시험을 추가하여 지층 특성을 확인한 결과 근입심도 4.5m 부근에서 콘 저항력과 주면마찰력이 크게 증가한 것을 확인하였다. 표준관입시험과 콘관입시험을 통한 지반조사 결과를 활용하여 산정한 석션압과 현장 실험 계측 값을 비교하였을 때, 표준관입시험 N값을 기준으로 지반 강도정수 산정한 결과와 콘관입시험을 통한 지반 강도 특성을 적용한 설계값을 비교한다면 표준관입시험 결과가 다소 과소평가되어 적용되어 질 수 있다고 판단되며, 석션압 산정을 위해서는 연약지반 특성 분석이 콘관입시험 결과를 반영하는 것이 보다 합리적인 결과를 도출할 수 있다고 판단되었다.

(3) 설계석션압 이상의 상한석션압을 적용하였을 때 실트질 사질토 지반에서 파이핑 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 설계석션압 이상의 상한석션압을 적용하게 되면 원형강관 내부 중 취약한 곳으로 석션압이 집중적으로 작용하여 국부적인 파괴를 발생시키는 것으로 판단되며, 침투류 해석을 통해 상한 석션압 이상의 석션압을 적용하여 파이핑이 발생 여부를 사전 검토하는 검증 방안의 하나가 될 수 있음을 확인하였다.

본 연구를 통해서 관입성평가를 위해 설계값으로 제시한 석션압으로 실트질 사질토 지반에 원형강관가물막이 시공이 가능한 것을 확인하였고, 석션을 이용한 시공에서 과도한 석션압 적용시 침투수의 영향으로 지반을 교란시켜 국부적인 파괴를 유발할 수 있으므로 원형

강관을 목표 근입 심도까지 설치하기 위해서는 설계석션압을 유지하면서 상한석션압 이상의 압력이 작용하지 않도록 시공시 관리하는 것이 필요한 것으로 판단하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설공법 개발, 20SCIP-B119953-05)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Bang, S., Preber, T., Cho, Y., Thomason, J., Karnoski, S. R., and Taylor, R. J. (2000), Suction Piles or Mooring of Mobile Offshore Bases, *Marine Structures*, Vol.13, No.5, pp.367-382.
2. Coastal Development Institute of Technology (2003), Technicalmanual for suction foundation, *Japan Coastal Development Institute of Technology*, translated into Korean by Park, W. S., Kwon, O. S., Jang, I. S., and Ahn, H. D. from Korea Ocean Research and Development Institute, 2010.
3. Dunham, J. W. (1954), Pile Foundation for Buildings, Proc, ASCE, *Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.80, NO.285.
4. Houlsby, G.T. and Byrne, B.W. (2005), "Design Procedures for Installation of Suction Caissons in Sand", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, *Geotechnical Engineering*, Vol.158, No.3, pp.135-144.
5. Kim, J.H., Lee, S.T., and Kim, D.S. (2018), "Evaluation of Soil Disturbance Due to Bucket Installation in Sand", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.11, pp.21-31 (in Korean).
6. Kim, J.S. (2019), "Numerical Investigation on Structural Behavior of a Lid with Stiffeners for Suction-installed Cofferdams", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.20, No.10, pp.7-17 (in Korean).
7. Kim, J.S., Jeong, Y.J., and Park, M.S. (2019), "Estimation on External Forces Applied to Suction Caisson Using Seepage Analysis", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.39, No.2, pp.317-325 (in Korean).
8. Korea Agency for Insfrastructure Technology Advancement (2015), "Development of a large-diameter steel pipe cofferdam method for the offshore bridge", *R&D planning research Report* (in Korean).
9. Robertson, P.K. and Campanella, R.G. (1983a). Interpretation of Cone Penetration Tests-Part I (sand), *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, No.4, pp.718-733.
10. Steensen-Bach J.D. (1992), "Recent Model Tests with Suction Piles in Clay and Sand", *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas.
11. Senders, M. and Randolph, M. F. (2009), CPT-based Method for the Installation of Suction Caissons in Sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *American Society of Civil Engineers*, Vol.135, No.1, pp.14-25.
12. Senpere, D. and Auvergne, G.A. (1982), "Suction Anchor Piles - A Proven Alternative to Driving or Drilling", *Offshore Technology Conference*, Houston, USA, Paper OTC 4206.
13. Tjelta, T.I. (1995), "Geotechnical Experience from the Installation of the Europipe Jacket with Bucket Foundations", *Offshore Technology Conference*, Houston, USA, Paper OTC 7795.
14. Szechy, K. (1966), "The art of tunnelling", *Akademiai kiado*, Budapest, pp.909-924.
15. Tran, M.N. and Randolph, M.F. (2008), "Variation of Suction Pressure during Caisson Installation in Sand", *Géotechnique*, Vol.58, No.1, pp.1-11.

Received : November 4th, 2020
Revised : November 20th, 2020
Accepted : November 21st, 2020