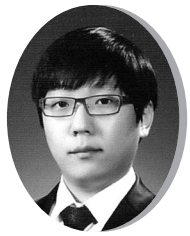
기술기사 1 | 한국지반공학회지 | Vol.29, No.12 | pp.8~16

모형토조실험을 통한 장대 케이슨 도입효과 검증

김 명 환
(주)연 차장
(mhkim@yeons.co.kr)


정 한 승
(주)알지오이엔씨 사원

김 종 석
현대산업개발(주) 부장

김 지 환
현대산업개발(주) 대리

1. 서론

최근 대수심 · 고파랑 해역에 축조되는 방파제는 대부분 케이슨식 구조형식이 대부분이고, 열악한 해역특성과 잦은 기상이변 등 외력의 증가추세와 맞물려 활동피해 또한 증가하는 추세이다.

일반적으로 케이슨의 경우 피해발생시 보수가 용이하지 않기 때문에 지반의 침하 및 활동 등에 의한 피해가 발생하지 않도록 방안을 모색하는 것이 시급한 실정이다.

따라서 본 실험에서는 장대 케이슨 형식과 독립 케이슨 형식의 구조물을 축소모형으로 제작한 후, 구조물하중과 상재하중에 따른 SCP 개량지반의 침하특성과 구조물의 안정성을 파악하고자 한다.

2. 모형토조실험

2.1 실험개요

구조물 형식과 지반조건에 따른 침하특성을 분석하여 장대 케이슨 구조물과 독립 케이슨 구조물의 거동경향을 파악하고자, 1/100의 상사율을 적용하여 모형토조실험을 수행하였다.

표 1. 실험개요

구 분	상사율	구조물 형식	비 고
모형토조 시험	1/100	장대 케이슨 구조물 독립 케이슨 구조물	

2.2 하중조건

실험에 적용한 하중은 표 2와 같으며, 구조물 실하중에는 부력 1/3을 고려하여 적용하였고, 독립식 케이슨은 시공순서와 동일하게 하중재하 순서는 제두부, 제간부, 접속부순으로 재하하여 침하량을 파악하였다.

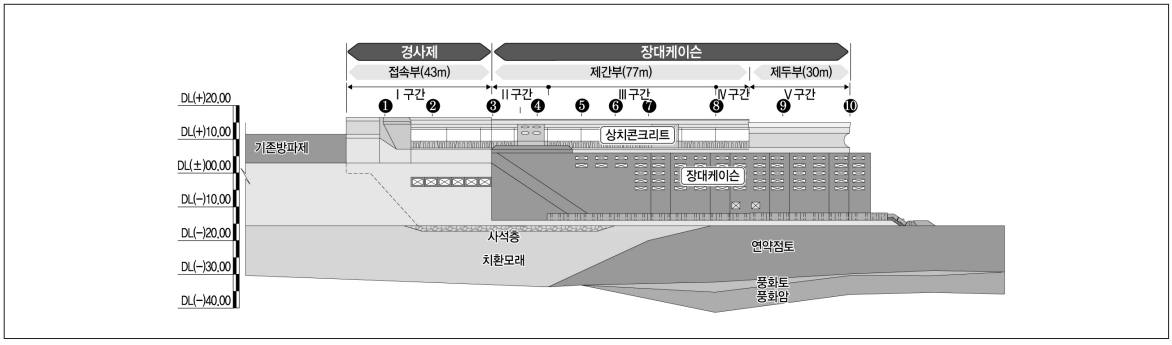
2.3 구조형식

하부지반은 풍화암층 및 풍화토층, 사질토층으로 구성되어 있으며, 구조형식은 콘크리트 케이슨 구조물, 점토층과 사석 제체형식을 적용하였다.

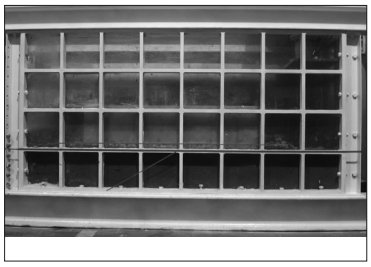
본 실험에서는 점토층과 치환모래층을 적용하고 점토층은 SCP 개량(개량율 71%)을 실시하여 적용하며, 시험을 위한 표준단면은 아래 그림 1과 같다.

표 2. 모형토조실험 적용 하중

구 분	구조물 실하중			상재하중			비고
장대 케이슨	제두부	제간부	접속부	제두부	제간부	접속부	부력 1/3
	1,000,000kPa			10kPa			
독립 케이슨	제두부	제간부	접속부	제두부	제간부	접속부	부력 1/3
	350,000kPa	300,000kPa	300,000kPa	10kPa			

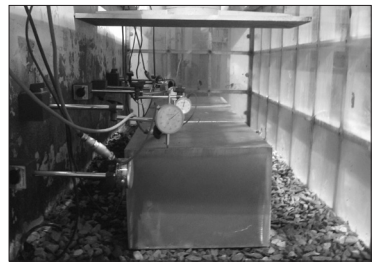


모형토조 모델링 단면



모형토조 모델링 완성단면

장대 케이슨 모델링



독립 케이슨 모델링

그림 1. 모형토조실험을 위한 표준단면 및 모델링

2.4 시험모델 설정

2.4.1 상사법칙

본 실험에서는 Iai and Sugano(1999)가 제안한 상사법칙을 적용한 모형토조실험을 실시하여 구조물의 지반-구조물-유체 상호작용을 파악한다. 본 시스템의 지배방정식을 정리하면 다음 표 3과 같다.

위 기본방정식으로부터 유도한 지반-구조물-유체 시스템의 원형과 모형과의 크기관계는 표 4와 같으며 상사법칙을 실제 진동대 모형시험에 적용할 때에는

표 3. 모형토조실험의 지배 방정식

지반(건조한 흙)에 대한 기본방정식	구조물(보)에 대한 기본방정식
평형 방정식 : $\mathbf{L}^{T}\boldsymbol{\sigma} + \rho\mathbf{g} = \rho\ddot{\mathbf{u}}$ 변위와 변형률 관계 : $d\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{L}\,d\mathbf{u}$ 구성방정식 : $d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\,d\boldsymbol{\epsilon}$ 여기서, $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_{11}\ \sigma_{22}\ \sigma_{33}\ \tau_{12}\ \tau_{23}\ \tau_{31})$ $\boldsymbol{\epsilon} = (\epsilon_{11}\ \epsilon_{22}\ \epsilon_{33}\ \gamma_{12}\ \gamma_{23}\ \gamma_{31})$ $\mathbf{u} = (u_1\ u_2\ u_3)$ D : 접선 계수, g : 중력가속도 $\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} \end{bmatrix}$	$EI\frac{\partial^4 \mathbf{n}^{T}\mathbf{u}}{\partial n^4} + \rho_b \mathbf{n}^{T}\ddot{\mathbf{u}} - \rho_b \mathbf{n}^{T}\mathbf{g} + \mathbf{n}^{T}\mathbf{S}\boldsymbol{\sigma} = 0$ $EA\frac{\partial^2 \mathbf{t}^{T}\mathbf{u}}{\partial s^2} + \rho_b \mathbf{t}^{T}\ddot{\mathbf{u}} - \rho_b \mathbf{t}^{T}\mathbf{g} + \mathbf{t}^{T}\mathbf{S}\boldsymbol{\sigma} = 0$ EI : 휨강성, $\mathbf{n}$: 보에 연직인 단위벡터, $\partial/\partial n$: n에 대한 미분, ρ_b : 보의 질량밀도(단위길이당 질량) $\mathbf{S}$: 응력을 표면력으로 변환시키는 행렬 $\boldsymbol{\sigma}$: 보에 작용하는 응력 EA: 축강성 $\mathbf{t}$: 보에 평행한 단위벡터 $\partial/\partial s$: t에 대한 미분

표 4. 모형토조실험을 위한 원형과 모형사이의 크기관계

물리량	원형과 모형사이의 크기관계			
	일반화된 원형과 모형사이의 크기관계	실제 작용하는 원형과 모형사이의 크기관계		
		Type Ⅰ	Type Ⅱ	Type Ⅲ
		$\lambda_\rho = 1$	$\lambda_\varepsilon = \lambda^{0.6}\ \lambda_\rho = 1$	$\lambda_\varepsilon = 1\ \lambda_\rho = 1$
길이(length)	λ	λ	λ	λ
밀도(density)	λ_ρ	1	1	1
시간(time)	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.6}$	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.6}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
가속도(acceleration)	1	1	1	1
속도(velocity)	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.6}$	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.6}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.6}$
변위(displacement)	$\lambda\lambda_\varepsilon$	$\lambda\lambda_\varepsilon$	$\lambda^{1.6}$	λ
응력(stress)	$\lambda\lambda_\rho$	λ	λ	λ
변형률(strain)	λ_ε	λ_ε	$\lambda^{0.6}$	1
강성도(stiffness)	$\lambda\lambda_\rho/\lambda_\varepsilon$	$\lambda/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^{0.5}$	λ
투수계수(permeability)	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}/\lambda_\rho$	$(\lambda\lambda_\varepsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
간극수압(pore pressure)	$\lambda\lambda_\rho$	λ	λ	λ
휨강성(flexural rigidity)	$\lambda^5\lambda_\rho/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^5/\lambda_\varepsilon$	$\lambda^{4.5}$	λ^5

Type I, II, 또는 III을 사용하였다.

지반 변형이 진동하는 동안에는 계속 증가하다가 진동이 멈춘 순간 변형을 멈추는 형태를 cyclic mobility type이라 하고 진동이 멈춘 후에서 계속해서 변형이 발생하는 형태를 strain softening type이라고 한다.

지반의 거동이 cyclic mobility type인 경우 지반-구조물 시스템의 거동을 파악하기 위해서는 변형률에 대한 크기관계(λ_ε)를 고려하는 것이 중요하다. 변형률에 대한 크기관계(λ_ε)는 모형지반의 전단파 속도를 알고 있을 때에는 아래 식을 이용한다(Type I). 원형과 모형의 거동이 cyclic mobility type이면 원형과 모형의 질량이 서로 같을 필요는 없다. 모형지반의 전단파 속도를 모를 때에는 원형의 질량과 모형의 질량이 거의 비슷하고, 전단탄성계수는 구속압의 제곱근에 비례한다고 가정하여 아래 식을 이용(Type II) 한다.

$$\lambda_\epsilon = \lambda \left[\frac{(V_s)_m}{(V_s)_p}\right]^2$$

$$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}$$

지반의 변형이 strain softening type일 경우에는 변형이 너무 커서 변형률에 대한 크기관계를 도입할 수 없다. 따라서 모형 지반을 느슨하게 조성해야만 원형에서의 흙의 변형률 연화거동을 모사할 수 있으며, 이때의 상사법칙은 아래 표에서 Type III을 사용하였다.

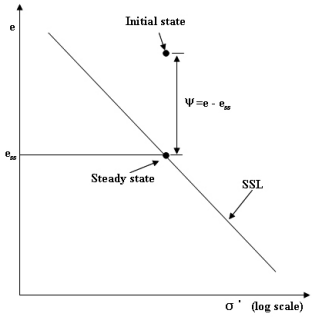
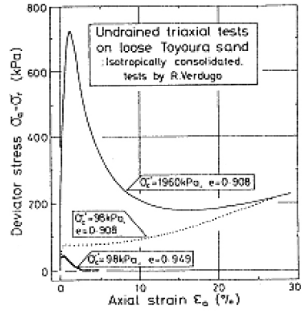
본 모형토조실험에서는 토조의 제원 및 제반 시험조건을 고려하여 제체 구조물을 원형의 1/100 크기로 모델링하였으며, 대상 지반의 동적 거동특성이 cyclic mobility의 형태를 보이므로 Type Ⅱ를 이용한 상사법칙을 적용하였다.

2.4.2 정상상태 개념

원형지반의 응력상태를 모형지반에서 정확히 구현하기에는 많은 문제점이 있으며, 이를 극복하기 위하여 한계상태 토질역학의 정상상태개념이 사용하였다.

정상상태개념이란, 유효구속압이 서로 다른 두 흙에 대해 상태변수가 같으면 같은 거동을 의미한다.

표 5. 정상상태선과 상태변수

정상상태 개념	흙의 거동
	
$\Psi = e - e_{ss}$ 여기서, Ψ : 상태변수 e : 초기간극비, e_{ss} : 정상상태선 위의 간극비 Ψ 가 (+)이면 압축거동, (−)이면 팽창거동	• 낮은 유효구속압을 받고 있는 매우 느슨한 모래의 거동이 높은 유효구속압하의 조밀한 모래의 거동과 유사. Verdugo(1992) • 이러한 개념을 적용한 1g 진동대 모형실험을 이용하여 현장지반의 거동을 모사. Scott(1989)와 Gibson(1995)

2.5 모형토조 실험

2.5.1 모형토조 실험장치

모형토조 시험장치는 평면변형률 토조, 재하장치 등으로 구성된다. 토조의 제원은 1,000(H) × 2,135(L) × 785(W)mm (V=1.67m³)이며, 토조의 앞 · 옆면은 마찰이 적은 투명 아크릴 판으로 제작하여 시험 단계별 지반의 거동을 사진판독을 통하여 관측할 수 있도록 하였고, 토조의 프레임은 강성이 큰 강재를 사용하여 하중 재하시 토조의 변형이 없도록 제작하였다. 시험에 사용한 대형 모형토조는 아래 그림 2와같다.

2.5.2 계측장치

지진하중 발생시 구조물의 수평 및 연직 변위량, 가속도의 변화량을 측정하기 위해 원지반 및 제체에 LVDT(Linear Variable Differential Transducer) 및 토압계를 설치하였다.

2.5.3 모형토조 실험순서

그림 4와 같다.

2.6 모형토조 실험결과

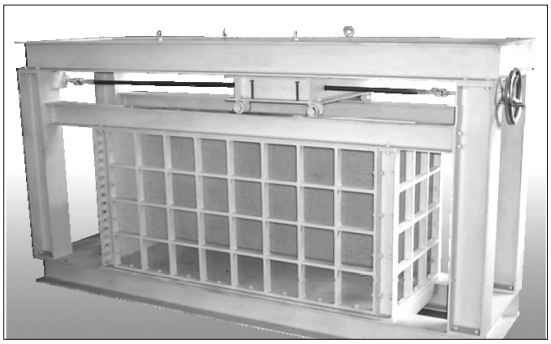
2.6.1 장대 케이슨

가. 변위측정 결과

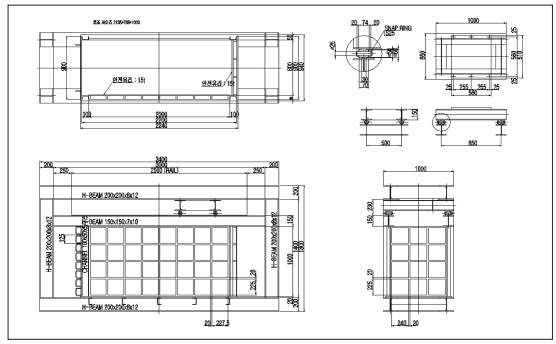
표 7과 같다.

나. 토압측정 결과

표 8과 같다.



대형 모형토조 전경



대형 모형토조 제원

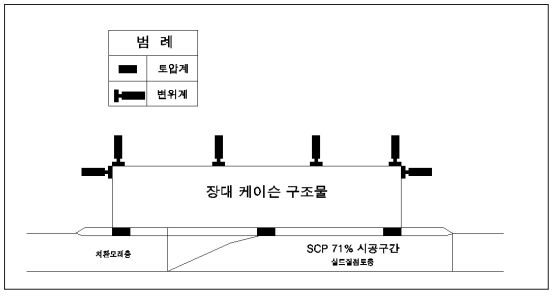
그림 2. 모형토조실험 장치

표 6. 대형 모형토조실험을 위한 시험장치

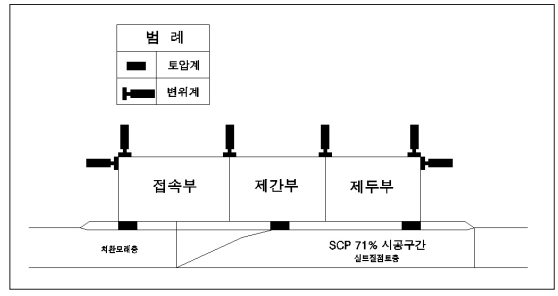
구 분		용도	제원
모형토조	모형토조	크기	1,000(H) × 2,135(L) × 785(W)mm (V=1.67m³)
		사용재료	강재 틀 및 아크릴
	공압 실린더	최대시험하중	5.0tf
측정센서	토압계	모델명	MPP
		최대 측정값	5.0kgf/cm²
	변위계	모델명	DT-20D
		최대 측정값	50mm

토압계

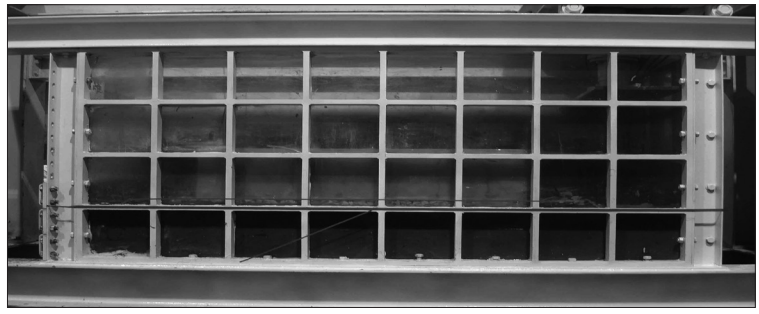
LVDT



장대 케이슨 구조물 계측기 위치도



독립 케이슨 구조물 계측기 위치도



모형토조 모델링 완성도

그림 3. 계측장치 위치 및 모형토조 모델링 완성도

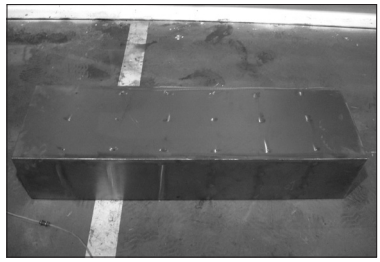
①점성토층 조성

②치환 모래층 조성

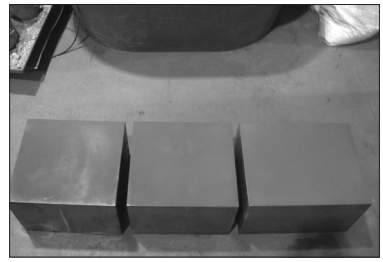
③SCP 지반개량(개량율 71%)

그림 4. 모형토조실험순서

④사석층 조성



⑤장대 케이슨 구조물 제작



⑥독립 케이슨 구조물 제작

⑦장대 케이슨 구조물 설치

⑧독립 케이슨 구조물 설치

⑨각종 측정 센서 설치

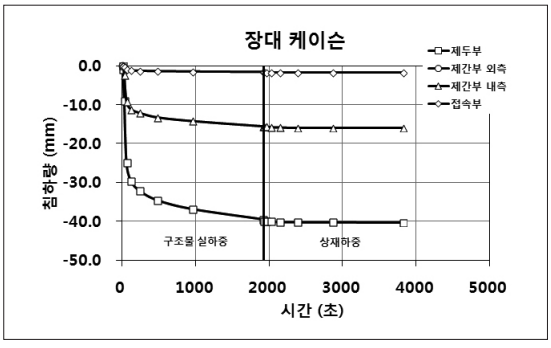
그림 4. 모형토조실험순서(계속)

표 7. 변위측정 결과

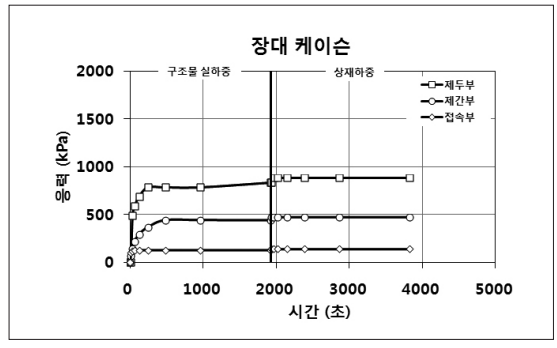
위치		제두부 수평	수직 변위				접속부 수평	비고
			제두부	제간부 외측	제간부 내측	접속부		
변위계 (mm)	구조물 하중	39.8	39.5	27.5	15.6	1.6	1.5	
	상재하중	0.2	0.8	0.6	0.4	0.2	22	

표 8. 토압측정 결과

위치		제두부	제간부	접속부	비고
토압계 (kPa)	구조물 하중	833.6	441.3	127.5	
	상재하중	882.6	441.3	127.5	



장대 케이슨 구조물 침하량



장대 케이슨 구조물 토압변화

그림 5. 장대 케이슨 구조물 침하량 및 토압변화

표 9. 장대 케이슨의 침하량 및 각변위

구분	제두부 침하량 (mm)	접속부 침하량 (mm)	부등침하량 (mm)	각변위
제두부	40.3	1.8	38.5	1/2,961

장대 케이슨 구조물에 구조물 실하중과 상재하중을 재하한 결과, 부등침하로 인하여 구조물의 각변위는 1/2,961로 나타났다.

2.6.2 독립 케이슨

가. 변위측정 결과

표 10과 같다.

나. 토압측정 결과

표 11과 같다.

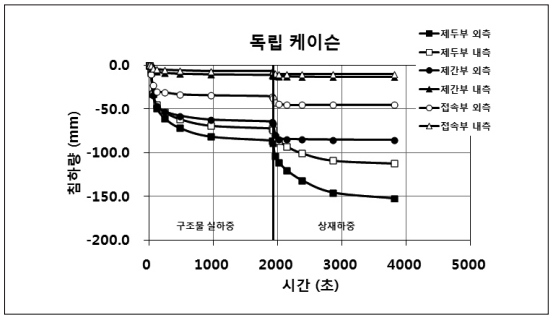
독립 케이슨 구조물에 구조물 실하중과 상재하중을 재하한 결과, 부등침하로 인하여 구조물의 각변위는 제두부 1/898, 제간부 1/276, 접속부가 1/1,186로 나타났으며, 침하량이 큰 구간은 치환 모래층보다 연약 점토층으로 갈수록 크게 발생한 것으로 나타났다.

표 10. 변위 측정 결과

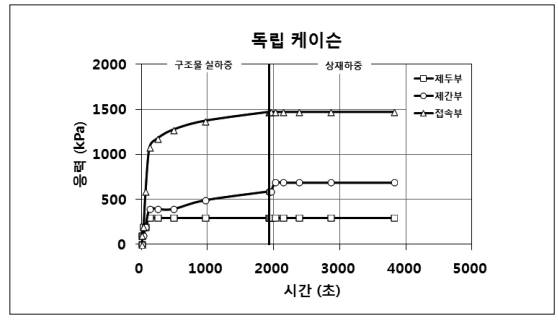
위치		제두부 수평	수직 변위				접속부 수평	비고
			제두부	제간부 외측	제간부 내측	접속부		
변위계 (mm)	구조물 하중	19.7	86.3	72.3	–	–	–	
		–	–	111.0	11.4	–	–	
		–	–	–	35.6	6.7	10.7	
	상재하중	12.1	66.2	40.1	–	–	–	
		–	–	33.1	2.3	–	–	
		–	–	–	9.8	3.3	2.0	

표 11. 토압 측정 결과

위치		제두부	제간부	접속부	비고
토압계 (kPa)	구조물 하중	294.2	588.4	1,471.0	
	상재하중	294.2	686.5	1,471.0	



독립 케이슨 구조물 침하량



독립 케이슨 구조물 토압변화

그림 6. 독립 케이슨 구조물 침하량 및 토압변화

표 12. 독립케이슨의 침하량 및 각변위

구분	제두부	제간부 외측	제간부 내측	접속부	부등침하	각변위
제두부(mm)	152.5	112.4	–	–	40.1	1/898
제간부(mm)	–	144.1	13.7	–	130.4	1/276
접속부(mm)	–	–	45.4	10.0	35.4	1/1,186

3. 맺음말

본 실험은 구조물 형식을 장대 케이슨과 독립 케이슨으로 나누어 구조물 실하중과 상재하중 작용시 발생하는 개량 지반의 침하특성과 구조물의 안정성을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 장대 케이슨 구조물은 최대 침하량 40.3mm로 나타났으며, 독립 케이슨 구조물은 최대 침하량 152.5mm로 나타났다.

② 장대 케이슨의 경우 구조물이 일체화되어 침하에 안정적인 것으로 나타났으며, 독립 케이슨의 경우 각 케이슨별로 하중이 작용하여 지반의 강도에 따라 부등침하의 경향을 보이는 것으로 나타났다.

③ 구조물 하중과 상재하중이 모두 재하 후 장대 케이슨 구조물에서는 제두부에서 882.6kPa, 독립 케이슨 구조물에서는 접속부에서 1,471.0kPa로 최대값을 나타냈다.

④ 지반의 상태에 따라 하중에 의한 지반이 받는 응력도 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

⑤ 장대 케이슨의 부등침하량에 의한 각변위량은 1/2,961이며, 독립 케이슨의 부등침하량에 의한 각변위량은 제두부, 제간부, 접속부에서 1/898, 1/276, 1/1,186인 것으로 나타났다.

모형토조실험 결과에서 보듯이 장대 케이슨은 독립 케이슨에 비해 침하량 및 부등침하가 작게 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 구조적인 이점에도 불구하고 실제 설계에서는 유지관리 및 시공성 등의 이유로 장대 케이슨의 적용이 극히 드문 현실이다. 앞으로 보다 면밀한 검토와 시공성 향상으로 적극적인 장대 케이슨의 활용이 이루어지길 바란다.

참 고 문 헌

1. 한국지반공학회, “지반공학 시리즈 6 연약지반”, 한국지반공학회.
2. 김 등 (2003), “지진시 중력식 안벽에 작용하는 하중성분의 모델링”, 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제19권, 2호, pp. 17–121.
3. Florin, V. A. and Ivanov, P. (1961), “Liquefaction of Saturated Sandy Soils”, Proc. 5th ICSMFE, Vol. 1, pp. 17–111.
4. Iai, S. (1989), “Similitude for Shaking Table Tests on Soil–Structure–Fluid Model in 1g Gravitational Field”, Soils and Foundations, JGS, Vol.29(1), pp. 15–118.
5. Iai, S. and Sugano, T. (1999), “Soil–Structure Interaction Studies Through Shaking Table Tests”, Proc. of 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol. 3, pp. 927–940.
6. Yoshimi, Y., Hosokawa, Y., Kuwabara, F., Tokimatsu, K. (1986), “Large Scale Cyclic Shear to Evaluate Methods for Mitigating Liquefaction Hazard”, Soils and Foundations, JGS, Vol. 26, N0. 3, pp. 137–142.
7. Yoshimi, Y. and Oh–oka, H. (1975), “Ring Torsional Apparatus for Simple Shear Tests, Proc. 8th ICSMFE, Vol. 1, pp. 501–506.