

Cell 구조물의 변형특성에 미치는 셀 벽면 마찰의 영향 The Effect of Wall Friction on Deformation Characteristics of the Cellular Bulkhead

손대산* · 장정욱* · 김경열** · 김현국* · 정연인***

Dae San Son*, Jeong Wook Jang*, Kyong Yeol Kim**, Hyun Guk Kim* and Youn In Chung***

요 지 : 본 연구에서는 기존의 근입비와 재하높이에 따른 모형실험의 결과를 바탕으로 셀 내벽의 마찰을 인위적으로 증감시켜 셀 구조물의 변형특성에 미치는 벽면 마찰의 영향을 알아보고자 하였다. 그 결과는 다음과 같다. 1. 재하높이가 낮아질수록 그리고 근입비가 증가할수록 셀 구조물의 변형특성에 미치는 벽면마찰의 영향은 적게 나타났다. 또한 벽면 마찰이 감소함에 따라 항복하중도 작은 값을 나타내었다. 2. 재하높이가 낮아질수록 그리고 근입비가 커질수록 셀 구조물의 수평이동 변위에 대한 회전성분 변위의 비가 작게 나타났다. 따라서 벽면 마찰의 영향은 회전성분 변위와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 셀구조물, 모형실험, 벽면마찰, 근입비, 재하높이

Abstract : This study examined the effect of wall friction on deformation characteristics of the cellular bulkhead, in terms of artificial wall friction based on the results of model tests according to the existing penetration ratio and loading height. 1. The effect of wall friction on deformation characteristics of the cellular bulkhead turned out to be less as the loading height decreases and the penetration ratio increases. The yield load also becomes less as wall friction decreases. 2. The ratio of the rotational displacement to the horizontal displacement of the cellular bulkhead becomes less as the loading height decreases and the penetration ratio increases. Hence it is concluded that the effect of wall friction has close relationship with the rotational displacement.

Keywords : cellular bulkhead, model test, wall friction, penetration ratio, loading height

1. 서 론

안벽이나 방파제 등과 같은 항만구조물 조성공사에 일반적으로 이용되는 공법에는 콘크리트 케이슨식 혼성제, 사석 식경사제, 콘크리트 블록식 혼성제 등이 있다.

이에 비해 강판 셀 공법은 강판을 사용하여 제작한 원통형의 셀(cell)을 해상으로 운반, 거치하고 셀 내부를 토사 등으로 속채움하여 구조물을 완성하는 공법으로서 설치와 동시에 채움재를 채우게 되므로 조기안정화가 가능하며, 구조가 단순하여 급속시공이 가능하고, 수밀성이 뛰어나다는 등의 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인하여 강판 셀 구조물은 1908년 가설구조물로서 탄생하여 그 후 1950년대 초 일본에 도입되면서부터 안벽이나 매립호안 등의 영구구조물로서도 본격적으로 이용된 구조물이다. 강판 셀 구조물은 설치 방법에 따라 거치식과 근입식으로 나눌 수 있다. 거치식 강

판셀의 경우는 수심 15 m 정도가 시공한계이나 근입식 강판 셀에 있어서는 셀의 강판 두께만 조절하면 20 m 이상의 대수심에 있어도 대형항만구조물의 시공이 급속도로 그리고 확실하게 가능하다는 특징을 가지고 있다. 또한 근입식 강판 셀에 있어서는 해저지반에 직접 타입하게 되므로 굴착이나 되메움과 같은 공정이 불필요하며 연약지반이라 하더라도 대규모 지반개량이 필요하지 않고 해수 오탁을 최대한 줄일 수 있다는 특징도 가지고 있다.

셀구조물의 설계이론은 셀의 거동에 대한 토질역학적인 해석 방법에 따라 크게 세가지로 분류할 수가 있다. 즉, R.Pennoyer 부터 시작되어 K.Terzaghi, P.P. Krynine, Tateishi로 연결되는 연직전단면을 가정한 연구, 수평전단면을 가정한 E.M. Cummings, Kitazima의 연구, 그리고 원호전단면을 가정한 G.Schneebeli, H.Brinch의 연구가 있다. 이러한 연구 결과 셀 구조물이 가지고 있는 많은 문제점들이 해명되었다.

*창원대학교 토목공학과 (Corresponding author : Jeong Wook Jang, Department of Civil Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea, jang@changwon.ac.kr)

**경남도청 건설항만방재국 치수방제과 (Water Center and Disaster Prevention Division, The provincial office of Kyung-Nam, Changwon 641-702, Kyung-Nam, Korea, kky1923@korea.kr)

***계명대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea, cyi@kmu.ac.kr)

장정욱(1996)은 재하높이와 근입비를 달리하는 근입식 강판셀 모형의 수평재하실험을 실시하여 하중과 변위의 관계 그리고 항복하중 및 항복모멘트에 미치는 근입비 및 재하높이의 영향을 조사함으로써 셀의 변형특성에 미치는 각각의 영향을 정성적으로 검토하였다.

이와 같은 셀 구조물에 대한 기존의 연구들은 강판과 채움재가 일체로 거동하는 것으로 간주하여 그 변형특성을 이해하려 하였다. 셀 구조물의 채움재는 주로 사질토를 이용하며 외부 강판과 채움재인 사질토 사이에는 벽면 마찰이 존재하게 된다. 그러나 기존의 연구에는 벽면마찰을 무시하고 있으며 그로인해 벽면마찰은 설계에서도 고려되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 셀구조물의 변형특성에 미치는 벽면마찰의 영향을 알아보고자 모형토조실험을 수행하였다.

2. 실험

토조에 채워지는 모형지반과 셀 내부 채움재는 기건상태의 낙동강 옥지사를 사용하였다. 실내시험결과 옥지사의 최대 건조단위중량은 1.608 t/m^3 , 최소 건조단위중량은 1.324 t/m^3 이고 단위중량이 약 1.50 t/m^3 즉, 상대밀도 66%일 때의 내부 마찰각은 44.03° 이었다. 곡률계수(C_u)는 2.06이고 비중은 2.631이다.

Fig. 1은 실험장치의 전체 개요를 모식적으로 나타낸 것이다. 모형토조는 길이 150 cm, 폭 100 cm, 높이 100 cm이며, 지반은 총 11개 층으로 나누어 각 층마다 $50 \text{ cm} \times 75 \text{ cm}$ 의 합판 2개를 덮은 채로 다짐봉으로 약 200회 정도 다져 조성하였으며, 균일한 지반이 조성되도록 노력하였다. 강판 셀이 근입되는 깊이, 즉 지면에서 약 30 cm 깊이까지는 단위중량이 $1.59 \sim 1.6 \text{ t/m}^3$ 정도가 되도록 하였다. 셀을 지반에 거치 또는 근입한 후 채움재는 7~8층으로 나누어 조성하였으며, 각 층마다 약 50회 붓 다짐하여 전체 단위중량이 $1.49 \sim 1.51 \text{ t/m}^3$ 이 되게 하였다.

셀의 제원은 Fig. 2와 같다. 근입 깊이 D와 셀의 높이 H의 비 D/H를 근입비라 정의하여, 근입비가 $D/H=0$, $D/H=0.25$, $D/H=0.5$ 인 3종류에 대하여 셀을 제작하였다. 벽면마찰의 대소는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 사포 또는 그리스를 셀 내벽에 부착시켜 표현하였다.

재하는 폭 4 cm, 두께 0.03 mm의 스테인레스 밴드를 모형

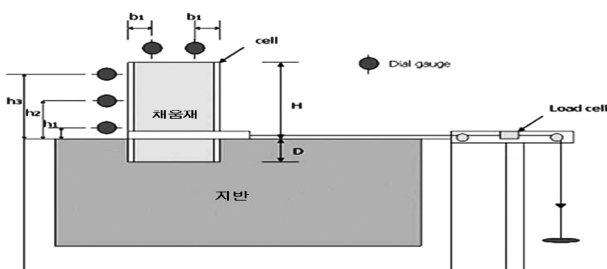


Fig. 1. 실험장치 개요.

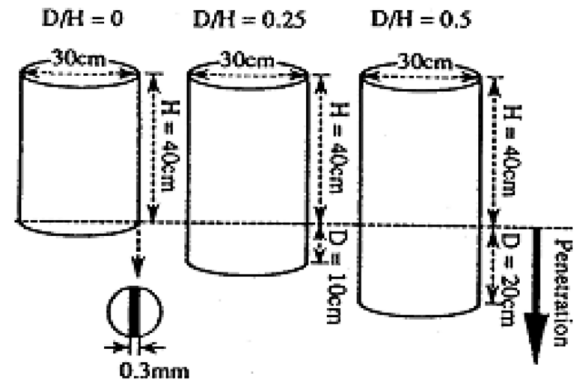


Fig. 2. 셀의 제원.

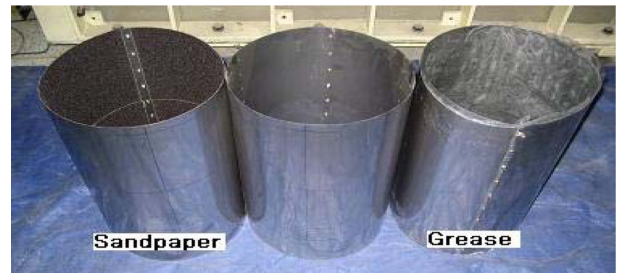


Fig. 3. 셀과 벽면마찰재.

Table 1. 실험조건 및 실험 series No.

마찰재	sandpaper			none			grease			
	상	중	하	상	중	하	상	중	하	
D/H	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0.25	10	-	-	11	16	17	12	-	-
	0.5	13	-	-	14	18	19	15	-	-

셀에 밀착되도록 설치하여 밴드와 Load cell을 연결하고, Load cell과 하중판을 와이어로 연결한 후 하중판에 하중을 가하는 방법으로 실시하였다. 재하하중은 Load cell에 의하여 측정하였으며, 재하점은 재하높이에 따라 각각 지면으로부터 2 cm(하부재하), 20 cm(중부재하), 38 cm(상부재하)로 하였다. 그리고 재하에 따른 셀의 연직, 수평방향의 변위는 Dial Gauge에 의하여 측정하였으며, 수평방향의 Dial Gauge는 셀 배면부에 지면으로부터 4 cm와 20 cm, 38 cm 지점에 설치하고, 연직방향의 Dial Gauge는 각각 셀 상단부 양단으로부터 5 cm 지점에 설치하였다.

Table 1과 같이 셀 내벽에 마찰재가 없는 경우(none)와 사포(sandpaper) 또는 그리스(grease)가 있을 경우에 대하여 근입비와 재하높이의 조건을 달리하여 총 19개 series의 실험을 수행하였으며 각 series마다 2회~3회 동일 조건을 실험을 반복 실시하였다.

3. 실험결과

3.1 마찰효과에 따른 변형특성

재하높이에 따른 셀 내벽에 작용하는 마찰의 영향을 알아보기 위하여 근입장이 없을 때, 즉 $D/H=0$ 일 때 마찰재가 없

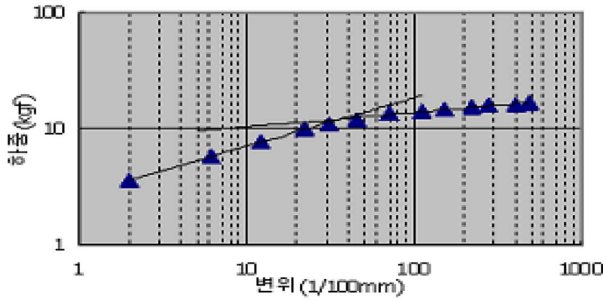


Fig. 4. 항복하중을 산정하는 방법의 일예.

Table 2. 마찰재와 재하높이에 따른 항복하중(kgf)

재하높이	벽면마찰재		
	sandpaper	none	grease
상부재하	8.86	8.66	7.4
중부재하	14.05	14.08	13.57
하부재하	23.09	23.2	23.23

는 셀과 사포를 부착하거나 그리스를 바른 셀을 이용하여 모형실험을 실시하였다.

항복하중을 산정하기 위하여 하중-변위관계를 양대수 그래프에 나타내어 그 관계를 직선으로 연결하여 보면 하나의 변곡점을 찾을 수가 있다. 이 변곡점은 하중에 의한 셀 변위의 변화율이 현저하게 나타남을 의미하므로 셀의 외관상 항복점으로 간주할 수가 있다. 그러므로 이 점에서의 하중을 항복하중이라 정의하고, 항복하중과 재하높이와의 곱으로 항복모멘트를 구하였다. Fig. 4는 항복하중을 구하는 방법의 일예를 나타낸 것이고, Table 2는 근입비(D/H=0)일 때 각 마찰재와 재하높이에 따른 실험결과로부터 항복하중을 산정하여 정리한 것이다.

다음 Fig. 5는 각 마찰재의 재하높이에 따른 항복하중을 그래프로 정리한 것이고, Fig. 6은 재하높이에 따른 항복모멘트를 나타낸 것이다. Fig. 5와 Fig. 6으로부터 재하높이가 낮아질수록 항복하중은 커지고 항복모멘트는 작아짐을 알 수 있다. 상부재하와 중부재하에 비하여 하부재하의 항복하중은 현

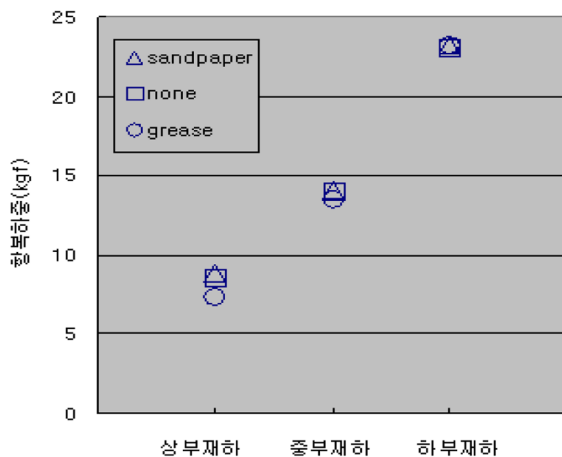


Fig. 5. 마찰재와 재하높이에 따른 항복하중(D/H=0).

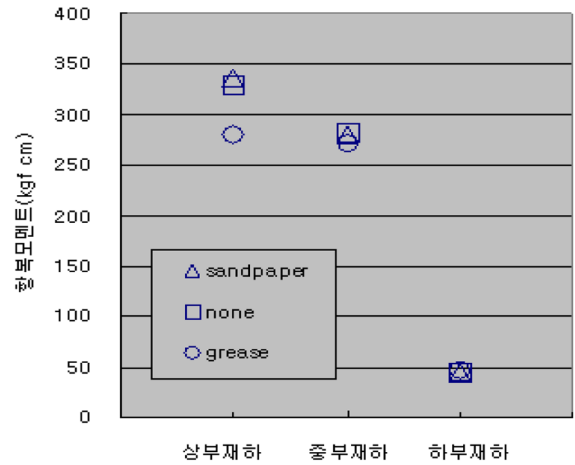


Fig. 6. 마찰재와 재하높이에 따른 항복모멘트(D/H=0).

격하게 크게 나타나고 항복모멘트는 상당히 작은 값을 나타내고 있다.

상부재하 또는 중부재하 시 셀 내부벽면에 그리스를 바른 경우는 사포를 부착하거나 마찰재가 없는 경우에 비하여 작은 항복하중과 항복모멘트를 나타내고 마찰재가 없는 경우와 항복하중의 차이가 중부재하보다 상부재하 시에 더 크게 나타났다. 셀 내벽에 그리스를 바른 경우와 같이 벽면의 마찰을 인위적으로 제거한 경우의 항복하중이 재하높이가 높을수록 더 작게 나타나는 것으로 미루어 볼 때, 셀 내벽의 마찰이 셀이 회전하려는 힘에 대하여 저항하고 있다는 것으로 간주할 수 있다.

하부재하에서는 상부재하와 중부재하 시와는 달리 마찰재의 유무와는 상관없이 비슷한 항복하중을 나타낸다. 하부재하 시에는 모멘트에 의한 변형보다는 수평변형이 크게 나타나기 때문으로 판단된다.

다음 Table 3은 마찰재가 없는 경우에 대한 각 마찰재에 따른 항복하중의 증가율을 나타내고 있다. 증가율은 마찰재가 없는 경우의 항복하중에 대한 각 마찰재가 있는 경우의 항복하중의 증가량을 백분율로 나타낸 것이고 증가율 산정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\left\{ \frac{\text{마찰재가 있는 경우 항복하중}}{\text{마찰재가 없는 경우 항복하중}} - 1 \right\} \times 100(\%) \quad (1)$$

Table 3에서 상부 또는 중부재하 시에 셀 내벽에 사포를 부착한 경우에는 항복하중의 증가율이 그리스를 바른 경우에 비하여 다소 작게 나타났다. 셀 내벽에 그리스를 바른 경우에는 항복하중의 증가율이 (-)값으로 나타났다. 즉 항복하중이 마찰재가 없는 경우에 비하여 감소하였다. Fig. 5와 Table 3

Table 3. 마찰재에 따른 항복하중 증가율(%)

재하부	sandpaper	grease
상부	2.3	-14.5
중부	-0.2	-3.6
하부	0.5	0.6

으로부터 재하높이가 낮아질수록 벽면마찰의 영향은 작은 것으로 나타났다. 이는 수평재하에 의한 셀의 변형이 상부재하일 경우에는 회전에 의한 변형이 지배적이고 하부재하일 경우에는 회전보다는 수평 변형이 지배적이기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 근입비(D/H)와 벽면마찰의 상관관계

근입비와 벽면마찰의 상관관계를 알아보기 위하여 마찰의 영향이 비교적 크게 나타나는 상부재하에 대하여 근입비를 달리하여 모형실험을 실시하였다.

Table 4는 마찰재와 근입비에 따른 실험결과로부터 항복하중을 산정하여 정리한 것이고, Fig. 7은 Table 4의 근입비에 따른 항복하중을 그래프에 나타낸 것이다.

Fig. 7로부터 D/H=0일 때와 D/H=0.25일 때 셀 내벽에 마찰재가 없는 경우보다 그리스를 바른 경우의 항복하중의 값이 작게 나타남을 알 수 있다. Table 5는 근입비와 마찰영향에 따른 항복하중의 증가율을 나타낸 것이다. 증가율 산정방법은 식 (1)과 같다.

Fig. 7과 Table 5에서 셀 내벽에 그리스를 바른 경우의 항복하중의 증가율은 근입비가 커짐에 따라 감소하는 경향을 보인다. 근입비가 커짐에 따라 근입된 부분이 지반에 접촉하는 면적이 넓어져 셀에 작용하는 수평토폰이 그 면적에 비례하

Table 4. 근입비에 따른 항복하중(kgf)

근입비 (D/H)	벽면마찰재		
	sandpaper	none	grease
0	8.86	8.66	7.4
0.25	12.26	11.78	11.24
0.5	21.43	20.88	20.62

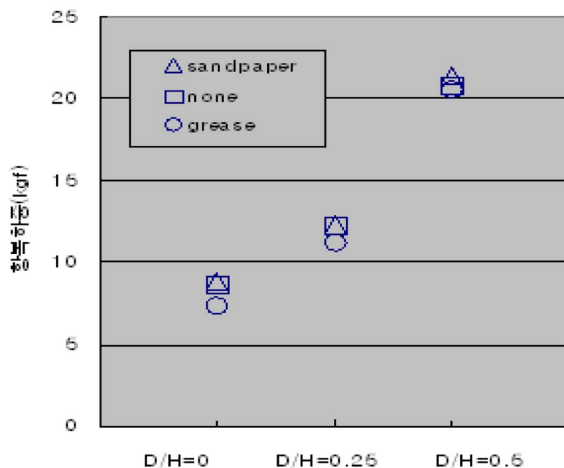


Fig. 7. 마찰재와 근입비에 따른 항복하중(상부재하).

Table 5. 근입비와 마찰영향에 따른 항복하중 증가율(%)

D/H	Sand paper	Grease
0	2.3	-14.5
0.25	4.1	-4.6
0.5	2.6	-1.2

여 커지면서 셀의 회전변형을 억제하였기 때문으로 사료된다. 그러므로 근입비가 증가할수록 마찰의 영향은 작아질 것이다.

재하높이와 근입비에 따른 마찰의 영향을 알아본 결과, 사포를 부착함에 따른 셀 내벽의 마찰력 증가의 영향은 크지 않지만, 그리스를 바른 경우의 마찰력 감소의 영향은 상대적으로 크게 나타났다. 또한 이러한 마찰력 감소에 의한 영향은 재하높이가 낮아질수록 그리고 근입비가 증가할수록 작게 나타났다.

3.3 근입비와 재하높이에 따른 수평성분과 회전성분 특성

셀 구조물의 변형특성은 크게 수평성분과 회전성분으로 구분할 수 있다. 재하에 의해 발생하는 수평성분과 회전성분의 특성을 근입비 또는 재하높이에 따라 검토하였다.

Fig. 8은 수평성분과 회전성분을 정의한 것이다. 수평변위는 항복 시에 지면으로부터 높이 4 cm에서의 셀 후면의 변위이다. 이것은 셀의 변형에서 수평성분이라 할 수 있다. 수평변위와 항복시에 발생된 지면으로부터 높이 38 cm에서의 셀 후면의 변위와의 차이를 d라 했을 때 d를 회전성분변위라 하였다.

다음 Table 6은 셀의 내벽에 마찰재가 없을 때 근입비와 재하높이에 따른 수평이동변위와 회전성분변위, 수평이동변위에 대한 회전성분변위의 비를 나타낸 것이고, Fig. 9는 Table 6의 근입비와 재하높이에 따른 회전성분변위/수평이동변위를 나타낸 것이다.

Fig. 9로부터 동일 근입비에 대하여 재하높이가 낮아질수록 수평이동변위에 대한 회전성분변위의 비가 작아지고 동일 재하높이에 대하여 근입비가 증가할수록 수평이동변위에 대

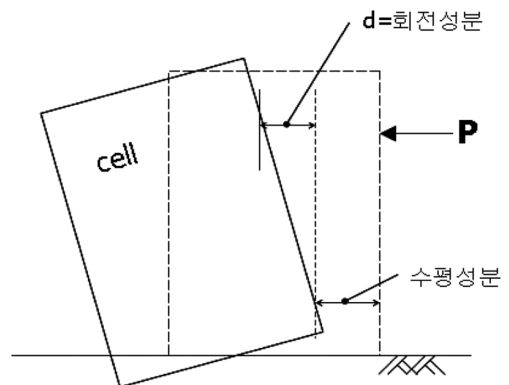


Fig. 8. 회전성분과 수평성분.

Table 6. 수평이동변위에 대한 회전성분변위 비

D/H	성분	재하높이		
		상부	중부	하부
0	회전성분변위	4.13	2.63	0.45
	수평이동변위			
0.25	회전성분변위	2.50	1.90	1.15
	수평이동변위			
0.5	회전성분변위	1.85	1.40	1.36
	수평이동변위			

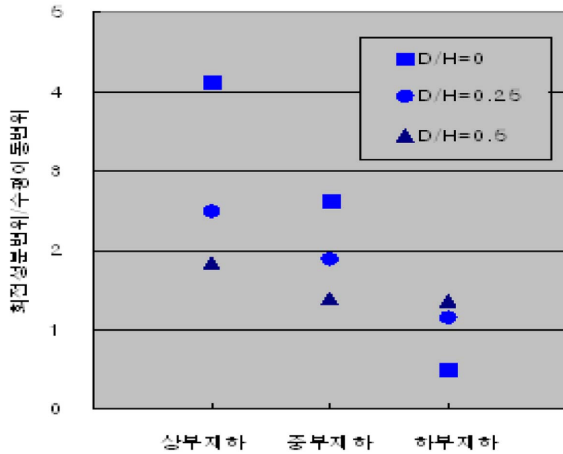


Fig. 9. 회전성분변위/수평이동변위.

한 회전성분변위의 비가 작게 나타남을 알 수 있다.

단 하부재하 시에는 근입비가 증가할수록 회전성분변위가 수평이동변위보다 크게 나타났다.

Table 6과 Fig. 9의 결과를 종합하여 볼 때 근입비가 커질수록 그리고 재하높이가 낮아질수록 수평이동변위에 대한 회전성분변위의 비가 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

근입비가 커질수록 그리고 재하높이가 낮아질수록 셀 내벽의 마찰영향이 줄어드는 사실로 미루어 볼 때 회전성분변위와 셀 내벽의 마찰영향이 밀접한 관련이 있고 회전성분변위의 비가 감소할수록 마찰 영향이 줄어든 것을 알 수 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 기존의 근입비와 재하높이에 따른 모형실험의 결과를 바탕으로 셀 내벽의 마찰을 인위적으로 증감시켜 셀 구조물의 변형특성에 미치는 벽면 마찰의 영향을 알아보고자 하였다. 그 결과는 다음과 같다

1. 셀의 벽면 마찰이 작을수록 항복하중이 작게 나타났고 근입장이 없는 셀에 대하여 재하높이가 낮아질수록 벽면 마찰의 영향은 적어지는 것으로 나타났다. 이는 셀에 작용하는 모멘트가 작아질수록 벽면 마찰의 영향이 적어지기 때문인 것으로 사료된다. 특히 하부재하 시, 회전에 의한 변형보다는 수평이동에 의한 변형이 지배적이므로 벽면 마찰의 영향이 거의 나타나지 않은 것으로 판단된다.

2. 동일 재하높이에 대하여 근입비가 커질수록 마찰의 영향이 감소하는 것으로 나타났다. 근입비가 증가할수록 수동토압에 의한 저항모멘트가 커지기 때문에 회전에 의한 변형보다는 수평이동에 의한 변형이 커진 것으로 판단된다.

3. 셀의 변형을 수평이동성분과 회전성분으로 나누어 수평

이동변위에 대한 회전성분변위의 비를 구해본 결과, 동일 근입비에 대하여 재하높이가 낮아질수록 수평이동변위에 대한 회전성분변위의 비가 작아졌다. 또한 동일 재하높이에 대하여 근입비가 증가할수록 수평이동변위에 대한 회전성분변위의 비가 작게 나타났다. D/H=0이고 하부재하할 때는 수평이동변위에 대한 회전성분변위의 비가 1보다 작았다.

4. 근입비가 커질수록 그리고 재하높이가 낮아질수록 수평이동변위에 대한 회전성분변위의 비가 감소하고 마찰영향이 줄어드는 사실로 미루어 볼 때 회전성분변위와 셀 내벽의 마찰은 밀접한 관련이 있음 알 수 있다.

참고문헌

- 민병형, 옥치율, 민일규 공저 (1999). 항만공학, 형설출판사.
- 박상길 (1996). 항만해양구조물의 설계, 新技術.
- 박용명, 오성남 (1997). 호안조성용 거치식 강관셀공법의 실험적 연구, 한국강구조학회 논문집 Vol.9 No.2, PP.250.
- 장정욱 (1997). 강제원통케이슨의 수평거동에 관한 이론적 해석, 청주대학교 산업과학 연구 제 15권, PP.118, 청주대학교 산업과학연구소.
- 장정욱 (1995). 근입깊이에 따른 채움재의 활동면에 관한 연구, 청주대학교 산업과학 연구 제 13권, PP.198~200, 청주대학교 산업과학연구소.
- 장정욱 (1996). 재하높이와 근입장이 Cell 구조물의 변형특성에 미치는 영향, 청주대 산업과학연구 제 14권, PP.1~7, 청주대학교 산업과학연구소.
- 정중화 (2006). 셀 구조물의 변형특성에 대한 해석적 연구, 창원대학교 산업대학원 석사학위논문.
- 손대산 (2007). 벽면마찰을 고려한 Cell 구조물의 변형특성, 창원대학교 대학원 석사학위논문.
- Cummings, E.M. (1960). Cellular Cofferdams and Docks, Transaction, ASCE, Vol.125.
- Terzaghi, K. (1945). Stability and Stiffness of Cellular Cofferdams, Transaction, ASCE, Vol.110.
- Hansen, J.B. (1953). Earth Pressure Calculation, The Danish Technical Press, The Institution of Danish Civil Engineers Copenhagen.
- Krynyne, D.P. (1945). Discussion on Stability and Stiffness of Cellular Cofferdams, Transaction, ASCE, Vol.110.
- Schneebeli, C. (1957). Contribution au Calcul de la Stabilité des Batardeaux a Double Paroi de Palplanches, Proceedings, 4th I.C.S.M.F.E.

원고접수일: 2009년 10월 6일

수정본채택: 2010년 7월 27일

게재확정일: 2010년 8월 6일