

水平載荷에 따른 鋼製圓筒 케이슨의 力學的 舉動

The Mechanical Behavior of Steel Circular Caisson by Horizontal Load

張 晶 旭*

Jeong-Wook Jang*

要 旨 : 강제원통케이슨의 역학적 특성을 규명하기 위하여 수평하중에 의한 실내모형실험을 수행하였다. 전체적인 경향으로서 셀강관에 국부적인 소성변형이 발생하는 하중 레벨에서 변위와 저면토압은 급격히 증가함을 알 수 있었다. 변위는 재하점위치에서 가장 크고 케이슨 상단부의 변위는 작은 값을 나타내었다. 저면토압은 재하면에 가까울수록 크며 하중 증가에 따른 토압증가를 또한 재하면에 가까울수록 커짐을 알 수 있었다.

핵심용어 : 강제원통케이슨, 모형실험, 변형특성, 저면토압

Abstract □ Model tests were performed to examine the mechanical behavior of steel circular caisson by horizontal load. It was generally found that displacements and bottom pressure of the caisson model were increased rapidly at the local plastic load. The maximum displacement was measured at the loading point, whereas the less displacement was measured at the upper part of the caisson model. The bottom pressure was getting higher, as it was nearer the loading side. Furthermore, the increase ratio of the bottom pressure was higher as the load was increased.

Keywords : steel circular caisson, model test, deformation characteristic, bottom pressure

1. 서 론

휨강성이 대단히 약한 강관으로 만들어진 원통체일 지라도 내부에 토사를 채우면 자립성이 생기며 배후의 토사에 의한 토압을 견딜수 있는 구조물이 된다. 이와 같은 구조물로서는 강시판셀, 강판셀, 근입식강판셀, 풀게이트셀등과 같은 셀구조물을 들 수 있다. 이들 구조물은 얇은 강관을 외각으로하여 그 내부에 채움재를 채움으로 인하여 형성되는 구조물이다. 이 구조물의 구조적인 특징은 토사에 의한 외측방향의 팽창력과 그에 대하여 원주방향으로 작용하는 강재의 인장력으로 인하여 전체적으로 안정된 구조체를 형성한다는 것이다(장·박, 1995; 石黑建等, 1968; 張等, 1992). 이와 같은 셀구조물의 장점을 이용하여 새로운 중력구조물로서 고안되어진 것이 강제원통케이슨이다.

강제원통케이슨은 원통형의 강판셀에 철근콘크리트 저판을 결합시킨 새로운 형태의 케이슨 구조물로서 마운드상에 일렬로 설치된 원통케이슨의 사이를 강판제 아크로 연결하여 연속벽체를 구축하고 벽체 내부에 채움재를 투입하여 호안등의 중력식구조물을 형성하게 된다. Fig. 1은 강제원통케이슨을 이용한 안벽의 시공 예를 나타내고 있으며, 강제원통케이슨의 주요 특징으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

① 셀 하부에 설치한 콘크리트 저판의 자중으로 인하여 원통케이슨의 중심의 위치가 낮아져 浮遊時에 안정성이 높다.

② 셀과 아크와의 연결부는 폐합시킨 후에 콘크리트를 투입하므로 콘크리트케이슨간의 결합 부에 비하여 수밀성이 높다.

③ 콘크리트케이슨에 비하여 자중이 작으므로 小型

*청주대학교 지구환경시스템공학과 (Department of Geo-Environmental and System Engineering, Chongju University, 36 Naedeok-dong, Chongju 360-764, Korea)

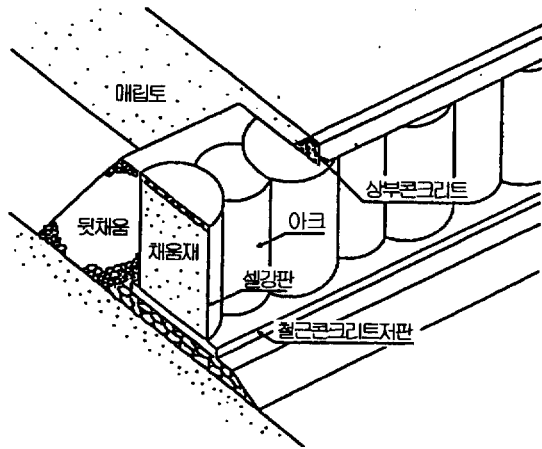


Fig. 1. An example of contract drawing of steel circular caisson.

起重機船으로 설치가 가능하여 공사비용을 대폭적으로 저감시킬수 있다.

④ 콘크리트 저판에 의하여 셀의 변형이 구속되 기 때문에 거치식셀에 비하여 변형에 강하며 시공시의 안정성이 높다(北島昭一, 1962).

⑤ 셀의 채움재로 모래를 사용할수 있기 때문에 채움재로 石材를 사용하는 거치식셀에 비하여 급속시공이 가능하다.

⑥ 셀의 하단이 저판과 결합되어 있으므로 거치식셀과 같이 채움재가 하단부로 유출하는 경우는 발생하지 않는다(北島昭一, 1962).

이러한 특징을 가지고 있는 강제원통케이슨은 호안이나 안벽 그리고 방파제등에 적용가능하나 아직 설계법이 확립되어 있지 않고, 우선 실용화에 앞서서 그 역학적특성을 규명해야 할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 강제원통케이슨의 모형에 수평재하를 실시하여 하중증가에 따른 원통케이슨의 변형특성 그리고

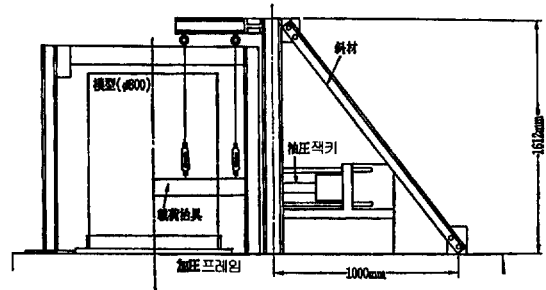


Fig. 2. Layout of testing apparatus.

하중과 저면토압과의 관계 등을 검토함과 동시에 종방향 리브에 의한 耐力向上效果를 확인하고자 한다.

2. 모형실험의 개요

Fig. 2는 실험장치의 전체 개요를 나타내고 있다. 그리고 Table 1은 실험조건 및 모형의 諸元을 정리한 것으로, 본 실험에서는 7 case의 수평재하실험을 실시하였다. 모형은 亞鉛引鐵板을 재료로하여 제작한 셀을 콘크리트底板에 接合한 것이다. 채움재로는 비중 $G_s=2.67$, 평균입경 $D_{50}=0.43$ mm, 균등계수 $U_c=3.36$ 인 건조사를 사용하였다. 재하는 삼각형의 토압분포를 想定하여 셀 높이의 1/3레벨(단, A-1은 2/3레벨)에서의 집중하중으로 하였으며, 원호상의 治具를 통하여 유압작기에 의하여 이루어졌다. 治具는 연직방향으로 폭이 10 cm이고, 모형의 재하측 1/2의 外周에 밀착되는 형상으로 되어 있다. 재하형식은 단조재하와 반복재하로 2종류이며, 반복재하의 경우는 5 cycle의 재하를 가했으며 cycle이 증가됨에 따라 최대하중을 서서히 증가시켰다. 재하중은 load cell에 의하여 측정하였으며 그 외에 원통케이슨의 수평변위, 셀강판과 아크의 strain, 채움재 저면의 토압 그리고 채움재의 단위체적중량 등

Table 1. The test condition and dimension of the model

模 型 No.	채움재密度 (t/m^3)	縱方向 rib (mm)	配置	채움재의 内部摩擦角	載荷形式	셀의 諸元 (mm)
A-1	1.64	無	單體	34.6°	單調載荷	
A-2	1.56	無	單體	31.4°	反復載荷	$\phi 394.4$
A-3	1.64	$h15 \times t0.27(4分割)$	單體	34.6°	單調載荷	$\times t 0.27$
A-4	1.63	$h15 \times t0.27(8分割)$	單體	34.2°	單調載荷	$\times h 500$
A-5	1.63	無	2連	34.2°	單調載荷	
B-1	1.62	無	單體	33.8°	反復載荷	$\phi 800$ $\times t 0.50$
B-2	1.69	$h30 \times t 0.50(8分割)$	單體	36.5°	單調載荷	$\times h 1000$

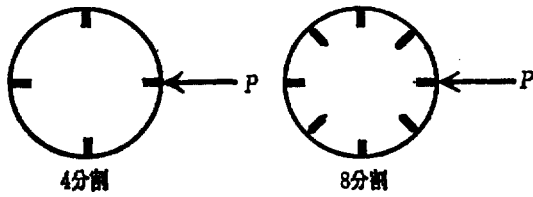


Fig. 3. Placement of rib.

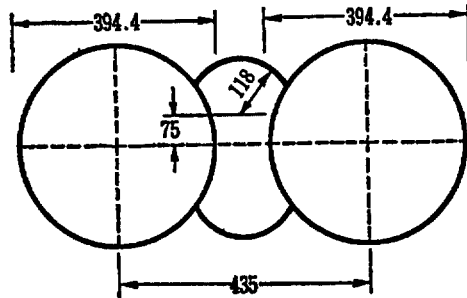


Fig. 4. Shape of A-5. (unit:mm)

을 측정하였다. Fig. 3은 A-3, A-4, B-2에 있어서 종방향 리브의 배치를 나타내고 있다. A-5는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 원통케이슨 간에 鋼製의 아크를 삽입하여 2連으로 되어 있다.

3. 실험결과 및 해석

3.1 하중과 변위의 관계

Fig. 5는 변위계 위치를 나타내며, Fig. 6은 각 실험에 있어서의 하중과 변위와의 관계를 나타내고 있다. 전체적인 경향으로서 재하중이 어느 값을 넘어서면 셀 강판에 국부적인 소성변형이 발생하며, 그 시점에 재하점위치에서의 하중~변위곡선은 급격히 굴곡한다. 그 때의 하중을 국부적인 소성화하중이라고 정의하기로 하며, 각 실험의 소성화하중과 최대하중을 Table 2에 나타내었다. 여기서 최대하중은 모형의 파괴하중이 아닌 실험을 수행하는 과정에서의 여러 가지 제약에 의하여 실험에서 재하한 최대의 하중을 의미하므로 역학적으로는 아무런 의미가 없다.

소성변형은 A-Series에서는 500~600 kgf에서, B-Series에서는 1,500~2,000 kgf에서 발생하고 있다. A-Series중 A-2,3,4의 소성화하중을 비교해보면, 다른 조건은 전혀 변하지 않고 종방향 리브에 의한 보강정도만의 차이로 소성화하중에 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 소성변형에 대한 리브의 효과는 있는 것으로

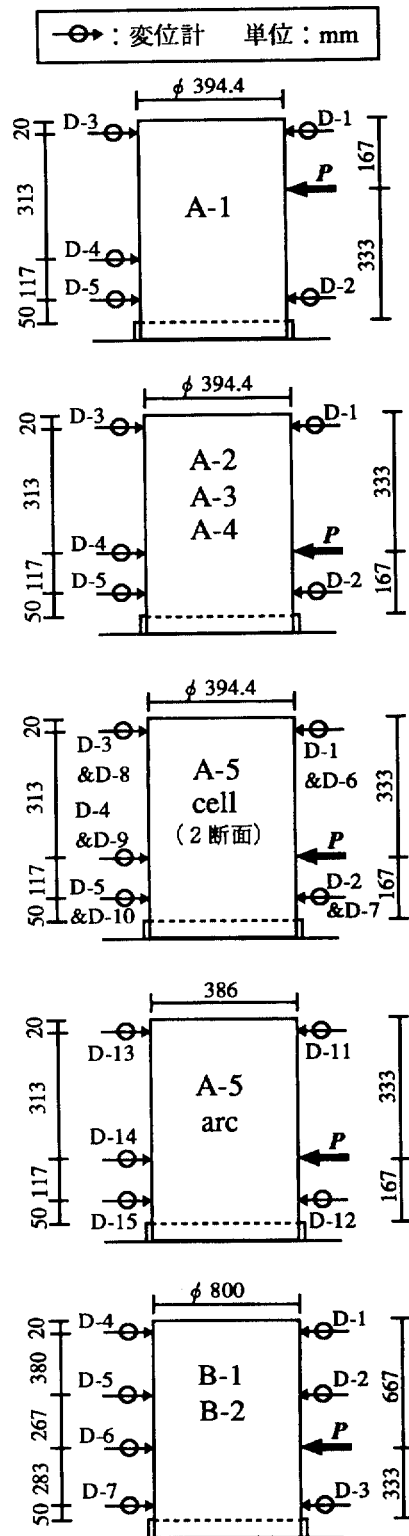


Fig. 5. Placement of displacement gauge.

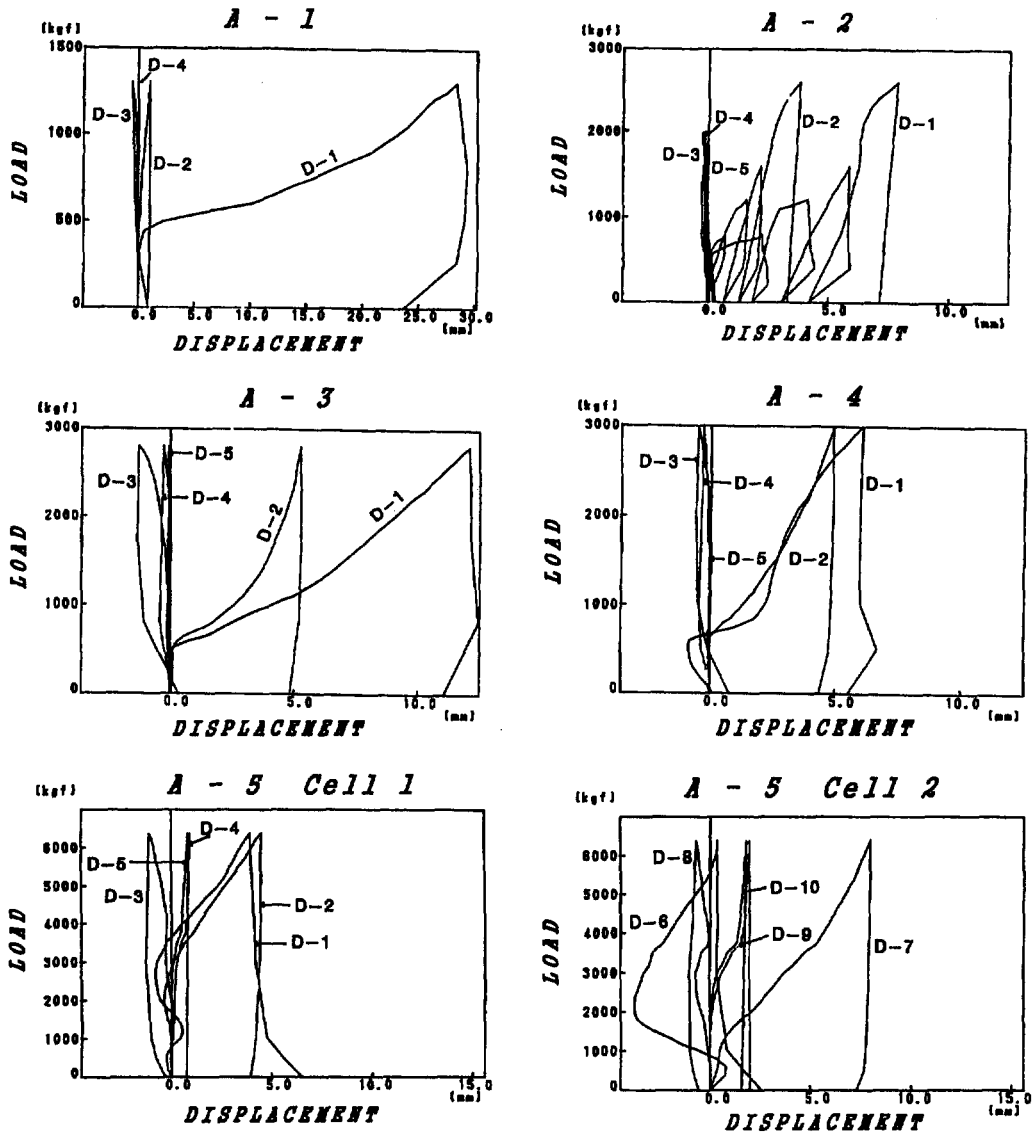


Fig. 6. Load versus displacement.

판단된다. 또한 1連과 2連의 소성화하중을 비교해보면 거의 동일하다. 이것은 재하치수가 부분적으로 접한 곳에서부터 셀 외각체의 소성변형이 시작되었기 때문으로 사료된다. 또한 B-Series의 소성화하중은 A-Series의 3~4배정도로 크게 나타나 있는데, 이는 B-Series의 모형크기가 A-Series의 2배인 점을 고려하면 거의 타당한 결과라고 생각할 수 있다.

Table 3은 각 실험의 하중과 변위와의 관계를 수치적으로 조사하기 위하여 소성화하중시와 최대하중시에 있어서의 재하점위치변위, 재하측상단변위 그리고 비

재하측상단변위를 정리한 것이다. 3箇所의 변위를 비교하여 보면, 재하점위치에서의 변위가 가장 크다. 재하측상단의 변위는 재하점위치에서의 변위에 비하여 작은 값을 나타내며 負方向(재하반대방향)의 변위도 있다. 비재하측상단은 거의 不動 내지는 負방향으로 움직이고 있다. 이것은 셀 높이의 1/3 위치에서 재하하였기 때문에 상단은 역방향으로 기울어진 결과라고 생각된다.

재하측과 비재하측의 변위를 비교하면, 대부분의 경우에 있어 재하측의 변위가 크다. 이것은 집중하중으

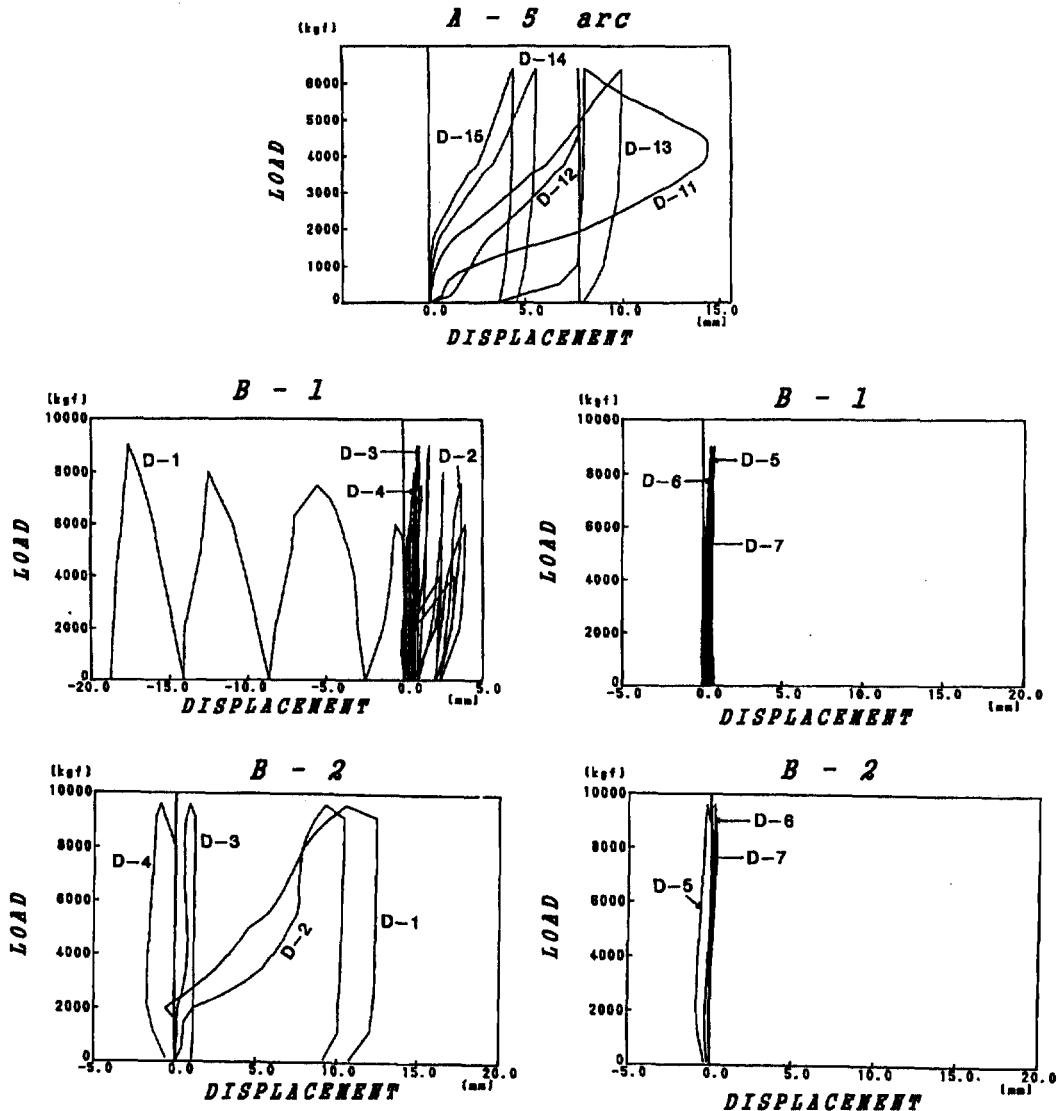


Fig. 6. (continued).

Table 2. Plastic load and maximum load

模型 No.	塑性化荷重(kgf)	最大荷重(kgf)
A-1	500	1300
A-2	500~600	2600
A-3	600	2800
A-4	650	3000
A-5	600	6400
B-1	1500~2000	9000
B-2	1500~2000	9500

로 인한 셸강판의 국부적인 소성변형과 저판 고정으로 인한 셸의 회전 구속이 그 원인이라 생각된다.

또한 A-5와 B-1의 재하실험 후, 채움재 토사를 제거하고 최대하중시의 변위까지 다시 재하하여 그 하중을 측정된 결과 A-5에서는 549 kgf, B-1에서는 884 kgf이었다. 이 결과로부터 셸 외각체만의 저항은 전체의 약 10%정도임을 알 수 있다.

3.2 하중과 토압과의 관계

Fig. 7은 토압계의 위치를 나타내며, Fig. 8은 각 실험의 하중과 토압과의 관계를 나타내고 있다. 그리고 Fig. 9는 하중증가에 따른 저면토압의 변화를 모식적으로 나타낸 것이다.

Table 3. Displacements of three different point at the plastic load

模型 No.	載荷点位置變位 (mm)		載荷側上端變位 (mm)		非載荷側上端變位 (mm)	
	塑性化荷重時	最大荷重時	塑性化荷重時	最大荷重時	塑性化荷重時	最大荷重時
A-1	3.40	28.81	2.18	28.36	-0.08	-0.57
A-2	2.80~3.11	29.03	0.06~0.20	7.82	0.00	—
A-3	3.84	26.61	0.72	12.09	-0.03	-1.28
A-4	4.01	25.65	-0.46	6.05	-0.09	-0.53
A-5	4.19	38.69	-0.25	3.94	0.00	-1.09
B-1	3.26~6.55	55.76	0.47~0.35	-17.66	-0.14~-0.11	0.87
B-2	2.80~4.16	44.50	0.13~0.57	10.55	-0.08~-0.10	-0.94

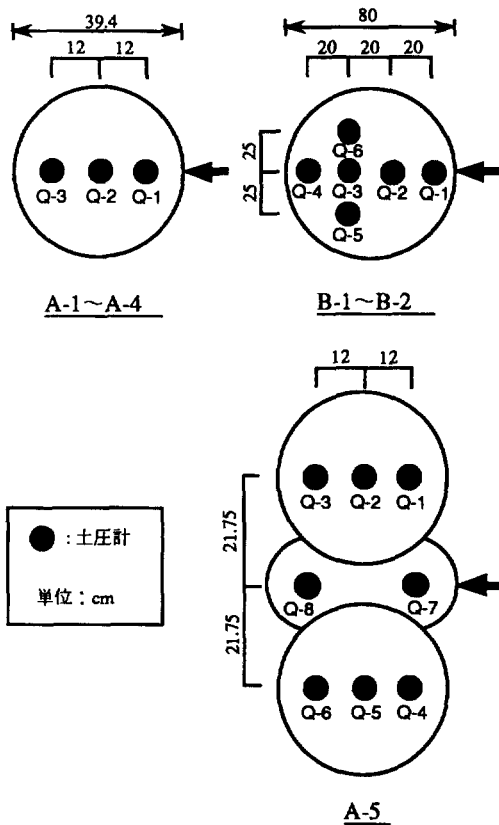


Fig. 7. Placement of pressure meter.

전체적으로 소성화하중 레벨에서 토압이 급격히 증가하는 현상을 보이고 있다. 이것은 셀강판의 변형에 의하여 채움재의 토사가 상하방향으로 밀려났기 때문으로 생각된다. 그리고 背面(載荷側)에 가까운 토압일수록 재하중의 증가에 따라 크게 증가함을 알 수 있다. 이와같이 토압이 재하측에 치우쳐져 있는 것은 집중하중에 의한 것으로 생각된다. 또한 B-Series의 저면토압은 A-Series의 1/2에 지나지 않으며 토압증가율도 B-

Series는 A-Series에 비하여 작다. 이것은 B-Series의 재하높이가 높은 것이 원인이라 생각된다.

A-2, B-1의 경우, 재하가 반복됨에 따라 토압은 동일 하중에 있어서도 점점 커지고 있음을 알 수 있다. 이것은 채움재의 토사가 반복재하에 의하여 보다 조밀해졌음을 간접적으로 나타내고 있다.

A-2와 A-3의 Q-1 값을 비교하면 A-3보다 A-2의 경우가 더 크다는 것을 알 수 있다. B-1과 B-2에 대해서도 동일한 현상을 발견할 수 있다. 이것은 반복재하에 의해 채움재토사가 조밀해졌거나 종방향 리브에 의해 채움재로의 압력전달이 순조롭게 이루어지지 않았기 때문으로 생각할 수 있다. 그러나 A-3와 A-4의 Q-1 값을 비교해 보면 토압에 관한 리브의 영향은 확인할 수가 없다. 그러므로 A-2의 Q-1 값이 A-3의 Q-1 값보다 큰 것은 주로 반복재하에 의하여 채움재가 다져진 결과에 기인하고 있음을 알 수 있다.

Table 4는 소성화하중시와 최대하중시에 있어서 전연직토압 및 저면 중심에 대한 토압모멘트 계산결과를 나타낸 것이다. 단, 이 계산에서는 Fig. 10에 나타낸 I~VI의 각 구분에 있어서는 그 구분의 토압실측치가 균일하게 작용하는 것으로 가정하였다.

이 표로부터 좌굴하중시에 B-Series는 負의 편심거리, 즉 저면의 중심보다 前側에 토압합력이 있고, 그 이외에는 전부 正의 편심거리로 되어 있음을 알 수 있다. 또한 A-Series에서 재하높이가 높은 A-1의 최대하중시에 있어서의 연직토압 및 토압모멘트는 다른 실험에 비하여 작은 값을 나타냄을 알 수 있다. 이것은 재하높이가 저면에서 멀기 때문에 압력의 전달이 작았기 때문으로 생각할 수 있다.

여기서, 모형에 작용하는 하중 P를 채움재에 작용하는 하중 P_c와 셀강판에 작용하는 하중 P_s로 나누어 생각하여 다음과 같은 概算을 해보았다.

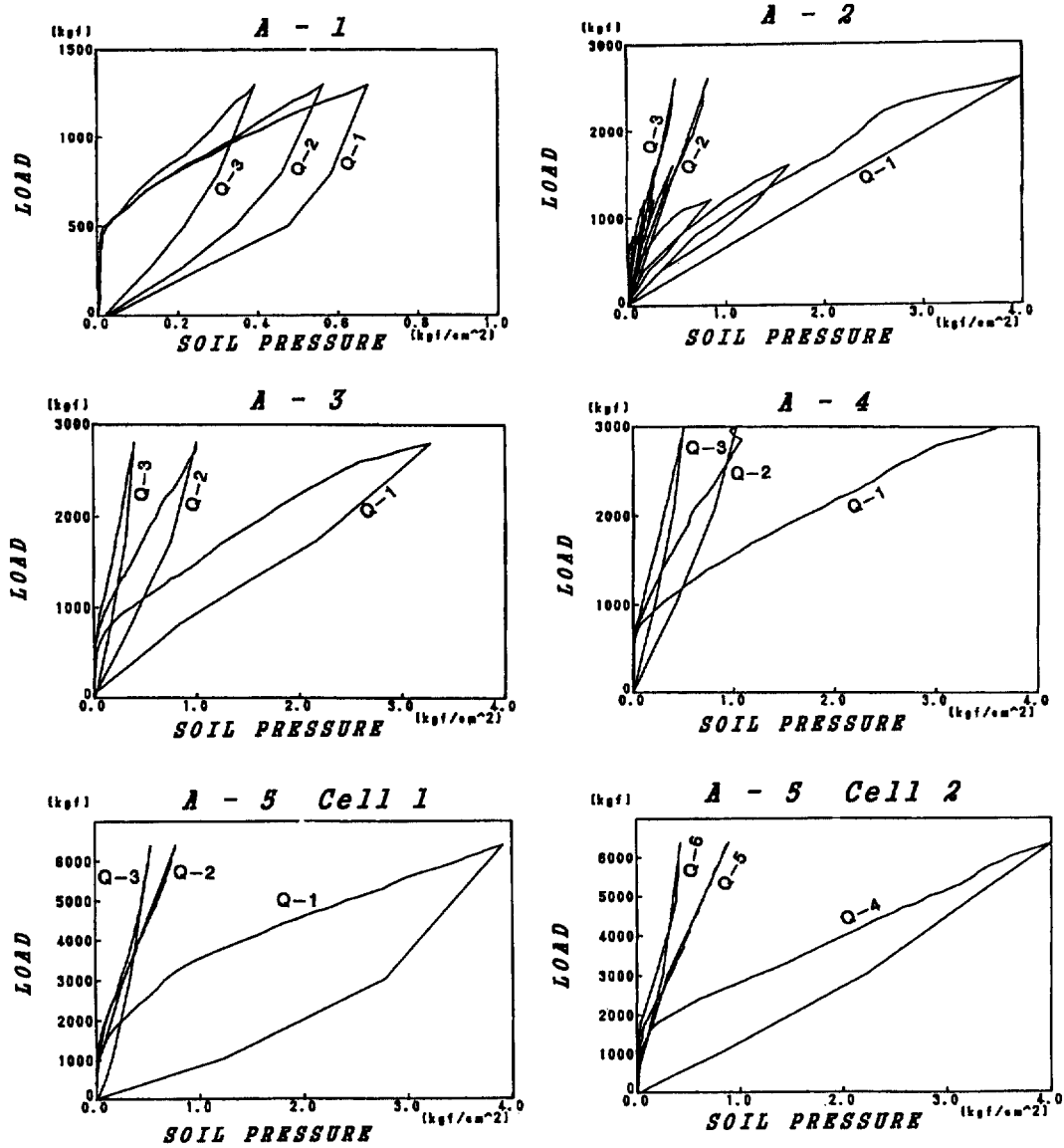


Fig. 8. Load versus bottom pressure.

Table 4에 나타난 전연직토압은 재하에 의하여 발생한 토압의 증가분이다. 따라서 Fig. 11의 T점 중심의 모멘트 평형조건으로부터 채움재에 작용하는 하중 P_s 를 식(1)에 의하여 구할 수가 있다.

$$P_s \times L = P_{vs} \times \left(\frac{R}{2} - e \right) = M_{sf} \quad (1)$$

여기서, P_{vs} =전연직토압(kgf), R =원통케이슨의 직경(cm), e =편심거리(cm), L =재하높이(cm), P_s =채움재에

작용하는 하중(kgf), M_{sf} =저면토압의 저항모멘트(kgf·cm)이다.

그리고 모형에 작용하는 하중 P 를 채움재토사에 작용하는 하중 P_s 와 셀강판에 작용하는 하중 P_c 의 합력이라고 하면 식(2)에 의하여 셀강판에 작용하는 하중 P_c 를 구할 수가 있다.

$$P_c = P - P_s \quad (2)$$

또한 Fig. 12에 나타난 O점 중심의 모멘트 평형조건

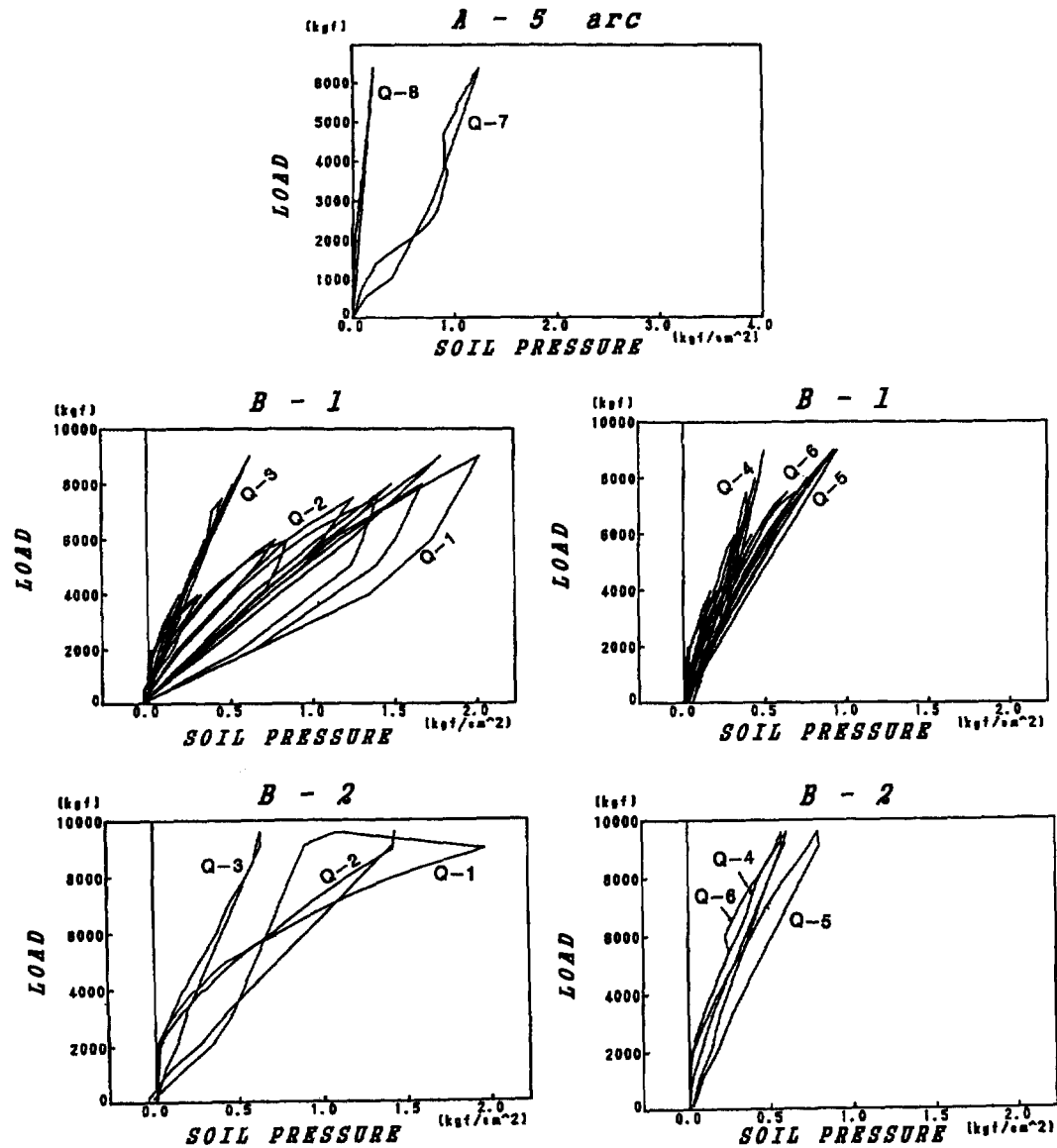


Fig. 8. (continued).

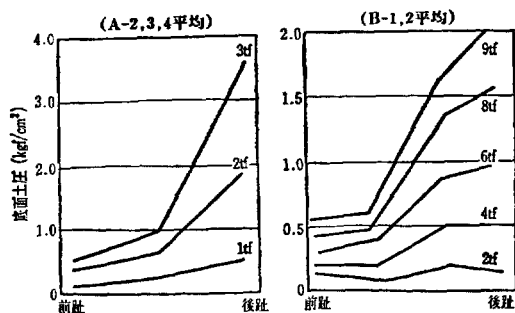


Fig. 9. Distribution of bottom pressure.

식으로부터 식(3)이 성립한다.

$$P_c \times L = M_{cf} \quad (3)$$

여기서 M_{cf} 는 보다 구체적으로는 채움재토사의 전단력, 채움재토사에 의한 벽면마찰력 등의 저항모멘트와 셀강관의 저항모멘트와의 합을 의미한다. Table 5는 이상의 계산결과를 정리한 것이다. 계산결과를 고찰해보면, M_{cf} 의 저항분담률이 최대하중시에는 전체의 약 40~50%이고 좌굴하중시에는 전체의 90%이상임을 알 수 있다. 그러나 3.1에서 언급한 바와 같이 채움재가 없

Table 4. Results of bottom pressure calculation

模型 No.	塑性化荷重時			最大荷重時		
	全鉛直土壓 (kgf)	土壓모멘트 (kgf · cm)	偏心距離 (cm)	全鉛直土壓 (kgf)	土壓모멘트 (kgf · cm)	偏心距離 (cm)
A-1	27.6	31.7	1.15	669.2	1274.3	1.90
A-2	15.0~26.0	31.7~99.8	2.11~3.80	2082.5	16003.8	7.68
A-3	29.6	167.8	5.67	1856.6	13124.1	7.70
A-4	28.3	81.6	2.89	2043.3	14294.2	7.00
A-5	41.9	188.6	4.50	3601.0	21831.5	6.06
B-1	56.1~176	-250~-295.9	-4.46~-1.68	6467.3	59650.8	9.22
B-2	52.3~84.9	-98.1~-204.1	-1.88~-2.40	5744.6	52905.6	9.21

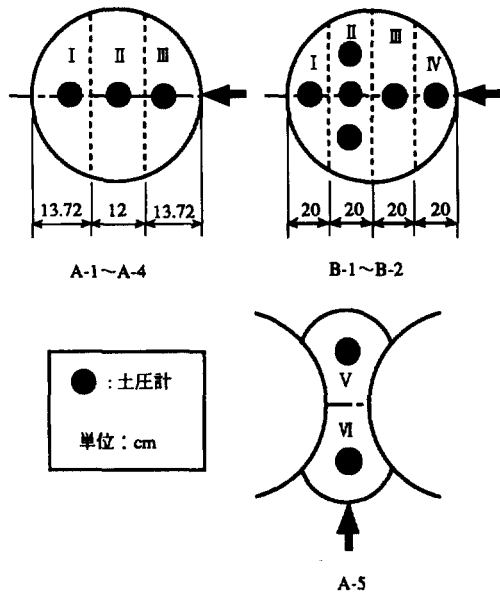


Fig. 10. Illustration drawing for calculating bottom pressure.

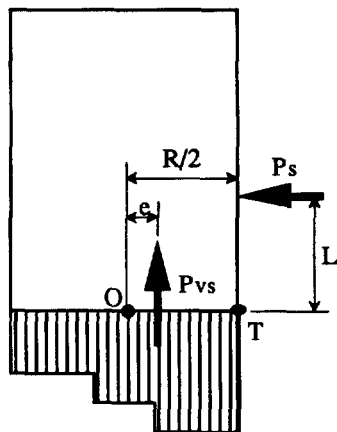


Fig. 11. Load acting filling.

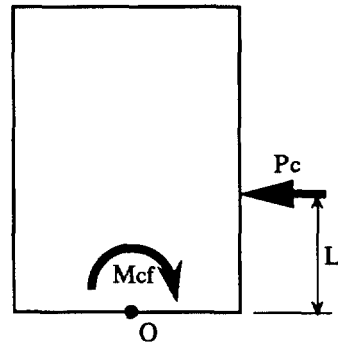


Fig. 12. Load acting steel plate.

는 경우, 최대하중시에 셀강판만의 저항은 채움재가 있는 경우의 10%정도였다. 그러므로 이 결과로부터 채움재가 있는 경우와 없는 경우에 있어서 저항 메카니즘의 차이를 추정할 수 있다. 즉, 채움재토사와 셀강판의 정확한 응력분담률은 구명하기 힘들으나 외력에 대한 저항에 있어서 두 재료의 상호협력 관계는 확인할 수가 있다는 것이다. 이 결과는 셀구조물의 구조적인 장점의 하나를 입증하고 있다고 할 수 있을 것이다.

4. 결 론

강제원통케이슨의 역학적특성을 규명하기 위하여 실내 모형실험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① 전체적인 경향으로서, 어느 하중에서 셀강판에 소성변형이 발생하고 그 때 재하점 위치에서의 하중~변위곡선은 급격히 굴곡한다. 또한 셀강판에 소성변형이 발생하면 토압도 급격하게 증가한다. 이것은 셀강판의 형상변화에 따라 채움재토사가 상하방향으로 밀려나기 때문으로 생각된다.

Table 5. Results of resisting moment calculation

模型 No.	塑性化荷重時			最大荷重時		
	M_{sf} (kgf · cm)	M_{cf} (kgf · cm)	$M_{sf} : M_{cf}$ (% : %)	M_{sf} (kgf · cm)	M_{cf} (kgf · cm)	$M_{sf} : M_{cf}$ (% : %)
A-1	513.9	16136.1	3.1 : 96.9	11925.1	31364.9	27.6 : 72.4
A-2	264.3~413.9	8085.7~9606.1	3.2 : 96.8~4.1 : 95.9	25031.7	18388.4	57.7 : 42.3
A-3	415.0	9605.0	4.1 : 95.9	23430.3	23329.7	50.1 : 49.9
A-4	476.0	10379.0	4.4 : 95.6	25990.8	24109.2	51.9 : 48.1
A-5	637.7	9382.3	6.4 : 93.6	49045.6	57834.4	45.9 : 54.1
B-1	2496.5~7339.2	47453.5~59260.8	5.0 : 95.0~11 : 89.0	199192.8	100507.2	66.5 : 33.5
B-2	2191.4~3599.8	47758.6~63000.2	4.4 : 95.6~5.4 : 94.6	176933.7	139416.3	55.9 : 44.1

② 변위는 재하점위치에서 가장 크고, 재하측 상단의 변위는 재하점위치에서의 변위에 비하여 작은 값을 나타내며 負方向(재하반대방 向)의 변위도 있다. 이것은 셀 높이의 1/3위치에서 재하하였기 때문에 상단은 역방향으로 기울어진 결과라고 생각된다. 그리고 비재하측 상단은 거의 不動 내지는 負방향으로 움직이고 있다.

③ 토압은 재하면에 가까울수록 크고, 재하중의 증가에 따라 크게 증가한다. 그러나 이러한 현상은 재하 높이가 높은 실험에 있어서는 재하 높이가 낮은 실험에 비하여 현저하지는 않다.

④ 종방향 리브는 셀강판의 소성변형에 영향을 미친다.

⑤ 채움재가 없는 경우에 셀강판만의 저항은 전체의 10%정도이었으나, 채움재와 셀강판의 상호협력관계에서 발생하는 저항은 최대하중시에 전체의 40~50%, 좌굴하중시에는 전체의 90%이상이었다.

이상의 실험결과를 종합적으로 검토하여 보면, 재하에 따라서 다음과 같은 변형특성을 가지고 있음을 생각할 수 있다.

셀에 수평하중이 작용하면 우선 재하측 채움재가 압축된다. 소성화하중 레벨에서부터 재하치구가 모형에 소성변형을 일으키며 채움재 토사는 탄성변형과 소성변형을 동반하면서 변형하기 시작한다. 이때 셀의 변

위, 저면토압은 급격히 증대된다. 이후 하중이 증대됨에 따라 채움재의 압축영역은 비재하측으로 확대되어 간다. 이 압축영역이 비재하측에 도달할 때까지는 비재하측은 하중의 영향을 전혀 받지 않으므로 재하측의 강판만이 채움재의 압축으로 인하여 조금씩 변형한다. 채움재의 압축영역이 비재하측에 도달하면 비재하측도 조금씩 변형하기 시작한다. 여기서 한층 더 하중이 가해지면 외각의 강재가 소성화되며 동시에 채움재도 소성변형하는 것으로 생각된다.

참고문헌

- 장정욱, 1993. 셀구조물의 水平舉動에 關する 研究, 筑波大學 博士論文, 筑波大學.
- 장정욱, 박춘식, 1995. 알루미늄봉을 이용한 Cell Filling 재의 전단거동에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표논문집 III, pp. 431-434.
- 張晶旭, 澤口正俊, 山田恭央, 1992. アルミ棒の中つめのせん斷舉動について, 第 27回土質工學會研究發表會, pp. 1767-1768.
- 北島昭一, 1962. 岩盤上のセル構造物の破壊について, 土と基礎, 10(8), 25-33.
- 石黒建, 白石基雄, 海輪博之, 1968. 鋼矢板工法, 山海堂, pp. 329-332.