

알루미늄봉을 이용한 셀(Cell) 채움재의 전단거동에 관한 연구

A Study on Shear Behavior of Fill in Cellular Bulkhead
by Two-Dimensional Model Test with Aluminium Rods

장 정 옥*¹
Jang, Jeong-Wook

Abstract

Lateral loading model tests were performed on the rigid box-shaped cellular bulkhead by displacement-controlled method. The materials of ground and fill used in this study are two aluminium rods with different sections. The behaviors of ground and fill were recorded by photo/video techniques and failure mechanism created in ground and fill has been simulated two-dimensionally. Also the theoretical consideration about the test results was done on the basis of Hansen's earth pressure theory. As a result, the shape of sliding face created in the fill of cellular bulkhead was examined and the correlation between the location of sliding face and the loading height was also investigated.

요 지

강성이 큰 박스형 셀모형을 이용하여 변위제어방식의 수평재하실험을 실시하였다. 지반 및 채움재로서는 단면이 다른 두 종류의 알루미늄봉을 사용하였으며, 각각의 거동을 사진과 비디오로 기록하여 지반 및 채움재 내부에 발생하는 파괴메카니즘을 2차원적으로 시뮬레이트하였다. 또한 Hansen이 제안한 토압이론에 근거하여 실험결과에 대한 이론적인 고찰을 수행하였다. 그 결과 셀내부의 채움재에 발생하는 활동면의 형상 및 재하높이에 따른 활동면의 발생위치에 대한 상관관계를 규명할 수 있었다.

Keywords : Cellular Bulkhead, Model Test, Load Test, Behavior of Fill, Failure Surface

1. 서 론

셀구조물은 1908년 New York주의 Buffalo 부근에 있는 Black Rock이라는 항만공사에서 최초로 사용되어 졌으며 그 후 수문이나 가철

체등의 가설구조물로서 이용·발전되어져 왔다. 그러나 셀구조물의 뛰어난 수밀성과 자립성 그리고 구조가 비교적 간단하여 급속시공에 적합하다는 등의 장점과 그 적용성으로 인하여 근래에는 안벽이나 호안 등의 영구구조물

*1 정희원, 청주대학교 이공대학 자원공학과 전임강사

로서도 폭 넓게 이용되고 있다. 또한 최근에는 산업폐기물의 처리 및 각종 유해물질을 포함한 해저의 유기질점토 등을 봉쇄하기 위한 수단으로 수밀성이 높고 평가되어 새롭게 기대되어지고 있는 구조물이기도 하다. 이와같이 최초로 가설구조물로 이용되었던 셸구조물이 영구구조물로서 사용되어지는 과정에서 셸구조물의 형태 및 시공법 또한 대단히 다양해지고 있다.

셸구조물의 설계에 있어서 가장 중요한 문제는 셸의 전단파괴에 대한 채움재의 저항을 어떻게 평가할 것인가에 있다. 이에 대한 연구로는(北島昭一, 1962, 立石哲郎, 1955, Schneebeli, 1957, Krynine, 1945, Cumming, 1960, Hansen, 1953, Terzaghi, 195) 셸이 외력에 의해 변형할 때 채움재 내부에 발생하는 전단면을 어떻게 가정하느냐에 따라 크게 세가지로 나뉘어진다.

R.Pennoyer부터 시작되어 K.Terzaghi, P.P.-Krynine, 立石로 연결되는 연직파괴면을 가정한 연구, 수평파괴면을 가정한 E.M.Cummings, 北島の 연구 그리고 원호파괴면을 가정한 G.Schneebeli, H.Brinch의 연구가 있다. 그러나 이들 연구는 가설구조물을 대상으로 극히 단순화된 가정하에서 제안되었던 것으로서 셸구조물의 형태 및 시공법의 변화에 대응하지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 셸구조물을 영구구조물로서 보다 경제적이고 안전하게 설계하기 위해서는 셸구조물의 변화된 형태에 대응하는 셸의 파괴현상에 대한 연구가 심도있게 이루어져야할 것이다.

따라서 본 연구에서는 영구구조물로서 최근에 많이 이용되어지고 있는 근입식 셸구조물을 대상으로 하여 채움재로 알루미늄봉을 이용한 2차원적인 모형실험을 수행하였다. 그 결과 셸에 외력이 가해졌을 때 채움재에 발생하는 파괴메카니즘을 시뮬레이트하고 종래의 연구에는 언급되어 있지 않았던 채움재의 전단거동에 미치는 재하높이의 영향에 대해서도 검토하였다. 그리고 Hansen의 토압이론에 근거하여 실험치와 이론치를 비교·검토하였다.

2. 실험개요

그림 1은 실험장치 전체 개요를 나타내고 있다. 셸모형은 재하방향으로는 두께 0.3mm의 강판으로, 단면방향으로는 두께 10mm의 아크릴판으로 제작되어진 상자모형으로, 크기는 가로 24cm, 세로 20cm, 높이 35cm며 강성이 높은 구조로 되어 있다. 재하위치 및 변위계 설치 위치에는 목재로 보강되어져 있으며 2차원적인 변형을 실현하였다. 기초지반은 두께 5mm의 철판과 두께 10mm의 아크릴판으로 제작되어진 토조에 셸 채움재와 동일한 알루미늄봉을 채워서 만들었다. 채움재로서는 현실성을 고려하여 $\phi 2\text{mm}$ 와 $\phi 3\text{mm}$ 의 두 종류 알루미늄봉을 혼합하여 사용하였으며 평균밀도는 2.15g/cm^3 이다. 셸 모형의 근입깊이는 10cm로 하였으며 재하높이를 上部, 中部, 下部 3종류로 하여 합계 9회의 실험을 수행하였다. 재하는 reversible-motor에 설치한 鋼製의 rod에 의하여 변위제어방식으로 실시하였으며, 재하 rod의 선단부에는 롤러를 부착시켜 모형의 회전을 구속하지 않도록 하였다.

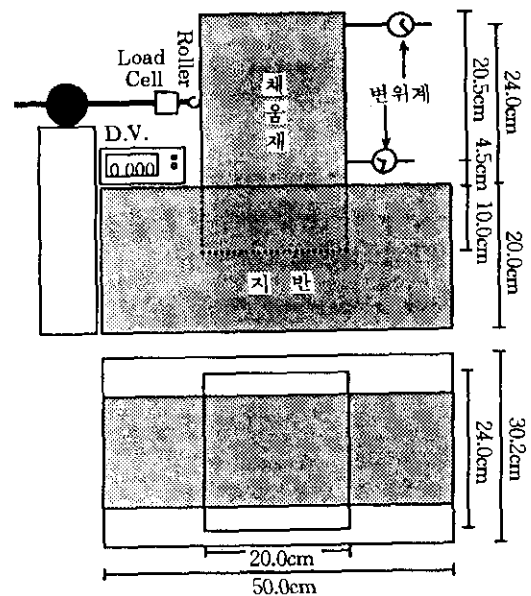


그림 1. 실험장치개요

지반과 채움재로써 알루미늄봉의 설치는 다음 순서에 준하여 실시하였다.

① 기초가 되는 지반에 알루미늄봉을 채운다.

우선 큰 용기내에서 직경이 다른 두 종류의 알루미늄봉을 잘 섞은 후, 한 주먹씩 들어내어 모형지반에 조금씩 채운다. 이때 지반의 밀도를 조사하기 위하여 채우는 알루미늄봉의 중량을 측정해 놓는다. 이러한 조작을 반복하여 지반 상면까지 알루미늄봉을 채우게 되는 데, 채우는 도중 적당한 위치에 봉의 선단을 빨간 매직으로 칠해 놓은 알루미늄봉을 설치하여 실험 중에는 표시해둔 알루미늄봉의 움직임에 주목한다.

② 모형셀을 기초지반위에 설치한다.

모형셀을 지반위에 가볍게 놓는다. 이때 셀의 자중에 의하여 약 2cm 정도가 근입된다. 이 상태에서 근입깊이가 약 10cm가 되도록 셀을 조심스럽게 지반중에 근입시킨다.

③ 모형셀에 있어서도 기초지반과 동일한 방법으로 알루미늄봉을 채운다.

각 실험의 조건은 표 1과 같으며 각 실험의 재하시에 셀에 가해지는 재하중과 셀의 변위량을 측정함과 동시에 채움재의 움직임을 사진과 video로 기록하여 활동면의 발생위치 및 형태 등에 관하여 검토하였다.

3. 실험결과

3.1 최대하중 및 저항모멘트

표 1은 실험조건 및 각 실험에 있어서의 최대하중과 peak시의 모멘트를 재하높이별로 정리한 것이다. 표중의 재하높이는 지반면으로부터의 높이를 나타내고 있다.

표 1로부터 재하높이가 낮아질수록 최대하중은 커지고 역으로 최대모멘트는 작아짐을 알 수 있다. 이 사실로부터 채움재의 전단거동에 미치는 재하높이의 영향을 확인할 수가 있으나 종래의 설계법에는 이에 대한 영향이 전혀 고려되어 있지 않다.

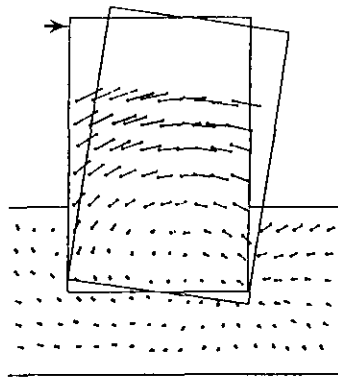
3.2 활동면

그림 2는 채움재의 변위분포도를 나타내고 있으며, 이 그림은 실험준비 단계에서 미리 표시해 두었던 알루미늄봉의 재하직전과 재하완료 후의 변위로부터 작성한 것이다.

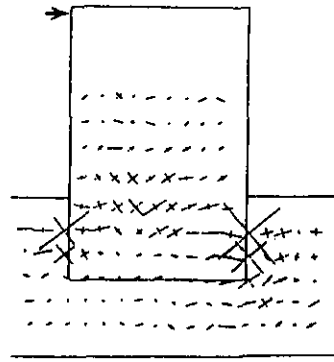
그림 3은 그림 2의 변위분포도로부터 구한 변형률분포도이며, 이 그림에서 직교하는 두 개의 직선은 그 교점에서의 최대주변형률과 최소주변형률을 나타내고 있다. 또한 점선은 압축변형률을 실선은 인장변형률을 나타내고 있다.

표 1. 실험조건 및 결과

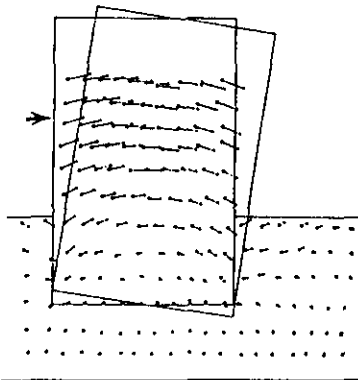
실험 No.	재하높이 (cm)	지반의 밀도 (g/cm ³)	채움재의 밀도 (g/cm ³)	최대재하하중 (kgf)	최대모멘트 (kgf·cm)
Test 1	24.6	2.16	2.15	5.58	139.7
Test 5	24.6	2.15	2.16	5.95	146.4
Test 7	24.6	2.14	2.16	6.09	149.8
Test 2	12.4	2.19	2.16	8.57	106.3
Test 6	12.9	2.17	2.16	9.55	128.5
Test 9	12.0	2.19	2.14	9.26	111.1
Test 3	5.1	2.15	2.16	13.77	70.2
Test 4	5.5	2.16	2.12	13.34	78.5
Test 8	5.5	2.15	2.21	14.03	77.6



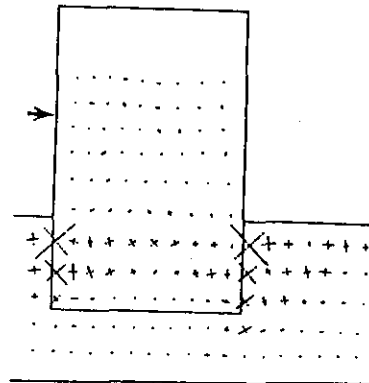
(a) TEST 1



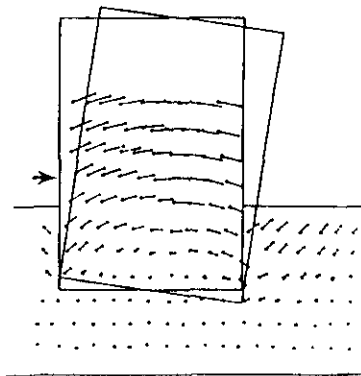
(a) TEST 1



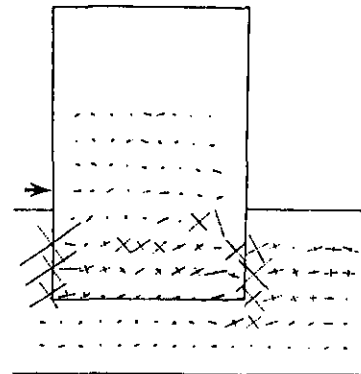
(b) TEST 9



(b) TEST 9



(c) TEST 4



(c) TEST 4

그림 2. 변위분포도

그림 3. 변형률분포도

재하가 진행됨에 따라 채움재의 알루미늄봉에는 서서히 활동이 발생되어 변위가 큰 영역과 작은 영역으로 나뉘어지게 된다. 그림 2로부터 변위가 큰 영역과 작은 영역의 경계면을 확인할 수가 있다.

그리고 그림 3을 관찰해보면 주변의 영역과 비교하여 변형률이 현격히 큰 부분이 열을 이루고 있는 것을 볼 수가 있는 데, 이 부분을 그림 2의 변위분포도에서의 경계면과 비교해보면 그 위치 및 형태가 비교적 일치하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실로 판단하여 볼 때 이 경계면은 활동면에 대응하고 있으며, 재하높이가 낮아짐에 따라 셀내부의 보다 낮은 곳에 위치함을 알 수 있다.

재하에 의한 모형셀의 거동은 크게 회전성분과 평행이동성분으로 나눌 수가 있다. 상부재하에서는 회전성분의 비율이, 그리고 하부재하에서는 평행이동성분의 비율이 크게 될 것으로 판단된다. 이러한 모형셀의 거동에 따라 비재하측 근입부의 수동토압의 크기는 달라질 것이다.

그림 2 및 그림 3으로부터 활동면의 형상을 객관적으로 추정하기는 힘들지만 Terzaghi 등이 제안한 연직파괴면이나 Cummings 등이 제안한 수평파괴면이기 보다는 G.Schneebeli 등이 제안한 원호파괴면에 가깝다는 것을 알 수 있다. 또한 재하높이에 따라 활동면의 형상에 다소 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 비재하측 근입부의 수동토압의 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

4. 이론적 고찰

4.1 Hansen의 토압이론

셀의 하단을 통과하는 원호활동면을 가정하여 셀구조물의 극한수평저항력을 각 힘들의 평형관계로부터 산출해내는 방법으로 Hansen의 토압이론이 있다.

그림 4는 본 연구에서 실시한 실험에 있어서의 힘의 평형관계를 나타내고 있다. 이 그림에

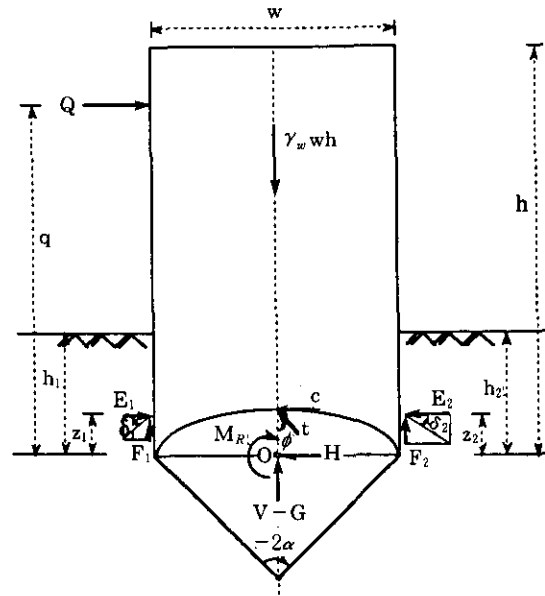


그림 4. 힘의 평형관계

서 힘의 평형방정식을 적용하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$Q = H - E_1 + E_2 \quad (1)$$

$$\gamma_w wh + G - V - F_1 - F_2 = 0 \quad (2)$$

$$M_R + Qc + \frac{1}{2}w(F_1 - F_2) + E_1 \cdot z_1 - E_2 \cdot z_2 = 0 \quad (3)$$

여기서, G는 셀 하단면과 활동면과의 사이에 포함되는 체적의 무게이다. G 및 반력은 다음식에 의하여 구하여진다.

$$G = \gamma_w^2 G^{\gamma} \quad (4)$$

$$V = \gamma_w^2 (V^{\gamma} + V^{\gamma} \sin 2\phi) - cw \cot \phi + wV^{\gamma}$$

$$\left(t' + \frac{c}{\sin \phi} \right) \quad (5)$$

$$H = \gamma_w^2 (H^{\gamma} + H^{\gamma} \cos 2\phi) + wH^{\gamma} \left(t' + \frac{c}{\sin \phi} \right) \quad (6)$$

$$M_R = \gamma_w^3 M_R^{\gamma} + w^2 M_R^{\gamma} \left(t' + \frac{c}{\sin \phi} \right) \quad (7)$$

여기서 γ 는 활동면 부근 채움재의 단위체적 중량이며, c는 채움재의 점착력이다. 채움재로 알루미늄봉을 사용한 이번 실험의 경우 점착력은 거의 없는 것으로 간주하여 여기서는 $c=0$ 로 한다.

식(4)~(7)을 식(1)~(3)에 대입하여 재정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$Q = \gamma w^2 D \left(G^z - V^z + H^z \frac{1}{D} \right) + \gamma_m w h D - F_1 D - F_2 D + E_2 - E_1 \quad (7)$$

$$t' = \frac{(\gamma_m h + \gamma w G^z - \gamma w V^z - \frac{F_1 + F_2}{D})}{V^y} \quad (8)$$

$$\gamma w^3 M_R^z + t' w^2 M_V^z + Q_0 + \frac{w(F_1 - F_2)}{2} + E_1 z_1 - E_2 z_2 = 0 \quad (9)$$

여기서,

$$V^z = V^{yz} + V^{xz} \sin 2\phi$$

$$H^z = H^{yz} + H^{xz} \cos 2\phi$$

$$D = H^{yz} / V^y$$

$$E_1 = \frac{1}{2} \gamma h_1^2 \lambda_y^2 \quad F_1 = E_1 \tan \delta_1$$

$$E_2 = \frac{1}{2} \gamma h_2^2 \lambda_y^2 \quad F_2 = E_2 \tan \delta_2$$

$$\lambda_y^2 = \rho_y + 0.007(e^{3\mu\phi} - 1)$$

$$\rho_y = e^{\mu(n/2 + \phi)} \cos \phi \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (\mu = \tan \phi)$$

이며, γ_m 은 채움재의 평균단위체적중량이다. 또한 α 의 함수인 각 계수들은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$G^z = \frac{1}{4} (\alpha + \alpha \cot^2 \alpha - \cot \alpha)$$

$$M_R^z = \cos \psi \frac{\cot \alpha}{16 \sin^2 \alpha} (A + B)$$

$$A = 2a \sin \psi + 4 \sin \phi \cos(\psi + \phi) \tan \alpha - \cos 2\phi \cos(\psi - 2\alpha)$$

$$B = -\cos \psi \cos 2\psi + \cos(\psi + \phi + \alpha) \{ 2v \cos \psi \cos(\psi - \phi + \alpha) - (v-1) \cos \phi \sec \alpha \}$$

$$\tan \psi = 2 \tan \phi$$

$$v = e^{4\mu\alpha}$$

$$M_R^z = \frac{\cos \psi \cot \alpha}{4 \sin \alpha} \{ \cos(\psi - \phi + \alpha) - v \cos(\psi - \phi + \alpha) + \frac{1}{2} (v-1) \cos \phi \sec \psi \sec \alpha \}$$

$$V^z = \frac{\cos^2 \psi}{8 \sin^2 \alpha} \{ \sin 2\psi - v \sin(2\psi + 2\alpha) + 2\alpha \}$$

$$V^y = -H^y = \frac{\cos^2 \psi}{8 \sin^2 \alpha} \{ v - \sec \psi \cos(\psi - 2\alpha) \}$$

$$H^z = \frac{\cos^2 \psi}{8 \sin^2 \alpha} \{ \cos 2\psi - v \cos(2\psi + 2\alpha) - 2\alpha \tan \psi \}$$

$$H^y = -V^y = \frac{\cos \psi}{2 \sin \alpha} \{ v \cos(\psi - \phi + \alpha) - \cos(\psi - \phi - \alpha) \}$$

$$V^y = H^y = \frac{\cos \psi}{2 \sin \alpha} \{ v \sin(\psi - \phi + \alpha) - \sin(\psi - \phi - \alpha) \}$$

그러므로 채움재의 내부마찰각 ϕ 와 α 의 값을 부여하게 되면, 각 계수의 값들이 구하여지고 그 값들을 식(6)과 식(7)에 대입하면 Q와 t'의 값을 얻을 수 있다. 그리하여 구하여진 Q와 t'를 식(8)에 대입하여 식(8)의 만족여부를 확인한다. 만약 식(8)을 만족시키지 못할 경우에는 α 의 값을 바꾸어 만족할 때까지 계산을 반복한다. 식(8)을 만족시킬 때의 Q를 극한수평저항력으로 하고 그 때의 α 의 값으로 활동면의 위치가 결정된다.

4.2 계산치와 실험치와의 비교

Hansen의 토압이론에 근거하여 본 연구에서 수행된 실험을 대상으로 극한수평저항력을 계산하였다. 계산을 수행하는 과정에서 다음과 같은 가정을 두었다.

- ① 채움재로서는 알루미늄봉을 사용하였으므로 채움재의 점착력은 거의 없는 것으로 간주하여 $c=0$ 로 하였다.
- ② $\delta_1 = \delta_2 = \phi$ 로 하였다. 여기서 채움재로 사용된 알루미늄봉의 값은 삼축압축 시험장치를 이용하여 실험을 수행한 결과 $\phi = 24^\circ$ 였다. 그럼 5는 알루미늄봉의 삼축압축시험 결과를 나타내고 있다.
- ③ 재하측의 지반반력 E_1, F_1 (주동토압)은 미소한 값으로 간주하여 무시하였다.

표 2는 각 실험의 최대하중과 계산에 의하여 구하여진 극한수평저항력 그리고 그 때의 α 를 재하높이별로 정리한 것이다. 표 2의 재하높이는 셀 저면으로 부터의 높이를 나타내고 있다.

이 표로부터 극한수평저항력은 재하높이가

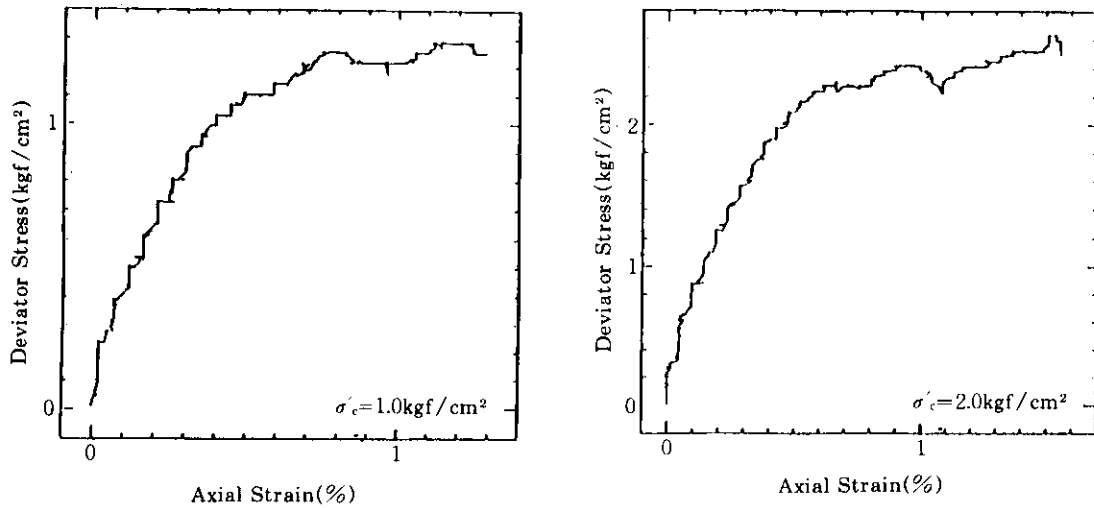


그림 5. 알루미늄봉의 응력-변형률곡선

표 2. 실험치와 이론치와의 비교

실험 No.	재하높이 (m)	최대하중 (실험) (kgf)	극한수평저항력 (이론: $\phi=24^\circ$) (kgf)	$\alpha(^\circ)$
Test1	0.35	5.58	5.40	-84
Test5	0.35	5.95	5.43	-84
Test7	0.34	5.99	5.32	-81
Test2	0.23	8.57	8.24	-75
Test6	0.23	9.55	8.43	-75
Test9	0.23	9.26	8.22	-73
Test3	0.16	13.77	11.40	-60
Test4	0.16	13.34	11.47	-62
Test8	0.16	14.03	11.24	-61

낮은 실험의 경우에는 실험치와 계산치에 있어서 약간의 차이가 있으나 그 외의 실험의 경우에는 상당히 일치함을 알 수가 있다. 또한 재하높이와 원호활동면의 중심각 α 의 관계로부터 실험결과에서 보여진 바와 같이 재하높이가 낮아질수록 활동면의 위치가 낮아짐을 알 수 있다.

5. 결론

근입식 셀구조물을 대상으로 알루미늄봉을 이용한 2차원 모델실험을 수행하여 채움재 내부에 발생하는 파괴메카니즘을 검토하고, 채움재의 전단거동에 미치는 재하높이의 영향에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재하높이가 낮을수록 셀이 견딜 수 있는 최대하중은 커지고 역으로 최대모멘트는 작아진다.
- 2) 활동면이라고 생각되어지는 경계면을 확인 할 수 있었고, 그 경계면은 재하높이가 낮아질수록 셀 내부의 낮은 곳에 위치한다
- 3) Hansen이 제안한 토압이론에 의하여 이론적인 고찰을 수행한 결과 실험치와 이론치가 비교적 잘 일치하였으며, 재하높이에 따른 활동면의 위치변화에 대해서는 동일한 결과를 얻었다.
- 4) 활동면의 형상은 객관적으로 정확히 추정

하기는 힘들지만 G.Schneebeli등이 제안한 원호파괴면에 가깝다는 것을 알 수 있었다.

이번 실험은 동일한 근입장에 대하여 수행되었으므로 근입장에 따른 활동면의 형상 변화에 대해서는 정확히 규명할 수가 없었다. 이에 대한 연구와 재하높이 및 근입장을 고려한 근입식 셀구조물의 설계법에 대해서는 차후 심도있는 연구가 요망된다 하겠다.

참 고 문 헌

1. 장정욱(1993), 셀구조물의 수평舉動に關する研究, 筑波大學 博士論文, 筑波大學
2. 장정욱, 박춘식(1995), "알루미늄봉을 이용한 Cell Filling재의 전단거동에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표논문집Ⅲ, pp.431~434
3. 張品旭, 澤口正俊, 山田恭央(1992), "アルミ棒の中づ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
4. 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, Vol. 10, No. 8, pp.25~33
5. 石黒建, 白石基雄, 海輪博之(1968), 鋼矢板工法, 山海堂, 日本, pp.329~332
6. 立石哲郎(1955), "Cellular Bulkhead の設計法について", 土と基礎, Vol. 3, No. 9
7. Schneebeli, C.(1957), "Contribution au Calcul de la Stability des Batardeaux a Double Paroi de Palplanches", Proceedings, 4th I.C.S.M.F.E., Aug.
8. Krynine, D.P.(1945), "Discussion on Stability and Stiffness of Cellular Cofferdams", Transaction, A.S.C.E, Vol. 110
9. Cummings, E.M.(1957), "Cellular Cofferdams and Docks", A.S.C.E Proceedings WW3, Sept.
10. Cummings, E.M.(1960), "Cellular Cofferdam and Docks", Transaction, A.S.C.E, Vol. 125
11. Hansen, J.Brinch(1953), Earth Pressure Calculation, The Danish Technical Press, The Insitution of Danish Civil Engineers, Copenhagen
12. Terzaghi, K.(1945), "Stability and Stiffness of Cellular Cofferdam", Transaction, A.S.C.E, Vol.110

(접수일자 1996. 2. 27)