

성토재로서 산업폐기물 제지회의 지지력 분석

Analysis for Bearing Capacity of Paper Ash in Industrial Waste as Filling Material

이처근* · 안광국** · 허 열***
Lee, Cheo-Keun · Ahn, Kwang-Kuk · Heo, Yol

Abstract

In this study, centrifuge model tests were fulfilled to investigate the characteristics of bearing capacity of paper ash as a filling material. The model tests were done varying the footing width and gravity level. The settlement and vertical soil pressure by loading were measured. The results from the tests were compared with the one from FLAC program using finite difference method and bearing capacity theory. After all, it was shown that the characteristics of load-settlement represented the local shear failure, which the settlement ratio s/B showed inflection point around 25~30%. As g -level and footing width were increasing, the load strength was increasing. The ultimate bearing capacity from the tests was very closed the results from Terzaghi's theory. As the distance from footing center was increasing, the vertical soil pressure was decreasing. If E/B is higher than 7, the stress by loading was almost increasing. The vertical displacement from loading was the largest one around under the footing and was almost occurred when the $depth > 4cm$ and E/B is higher than 5.0

Keywords : Paper ash, Bearing capacity, Filling material, Centrifuge model test

요 지

본 연구에서는 제지회를 성토재로 활용할 경우 제지회의 지지력 특성을 파악하기 위하여 원심모형실험을 실시하였다. 모형 실험은 기초폭과 중력수준을 변화시켜 실시하였으며, 하중재하에 따른 침하와 수직토압을 측정하였다. 모형실험결과는 지지력 이론 및 유한차분 해석프로그램인 FLAC을 이용한 수치해석 결과와 비교·분석하였다. 실험결과, 하중-침하특성은 침하비 s/B 가 약 25~30%에서 변곡점을 나타내는 국부전단파괴 양상을 보이며, g -level과 기초폭이 증가할수록 하중강도가 증가하고 있다. 실험에서 측정된 극한지지력은 Terzaghi 이론에 의한 결과와 유사한 것으로 나타났다. 기초 중심에서 이격거리가 증가할수록 수직토압이 크게 감소하였으며, E/B 가 7이상에서는 하중재하에 따른 응력증가가 거의 발생하지 않았다. 하중재하에 의한 수직변위는 기초 직하부에서 가장 크며, 깊이 4cm 이상, 이격거리 $E/B=5.0$ 이상에서는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

주요어 : 제지회, 지지력, 성토재, 원심모형실험

* 정회원 · 충북대학교 건설기술연구소 연구원, 공학박사
** Illinois Institute of Technology 토목공학과 박사과정
*** 정회원 · 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

인구증가와 산업발달로 산업폐기물의 발생량은 매년 증가하고 있으며, 이들 폐기물 중 제지공장에서 제지슬러지를 소각후 발생하는 제지회도 종이 소비량 증가에 따라 해마다 그 발생량이 증가하고 있다. 이러한 산업폐기물의 처리를 위해 막대한 인력과 처리비용이 소요되고 있다. 국내 제지공장 폐기물의 연간 발생량은 1,721천톤에 달하고 있으며, 이중 제지회는 전체 발생량의 약 15%인 258천톤에 달하고 있으며, 제지폐기물의 처리를 위해 매년 약 172억원, 그리고 제지회의 처리비용으로 26억원이 소요되고 있다(한국제지공업연합회, 1999). 이러한 제지회를 성토재 등 건설재료로 활용하게 된다면 산업폐기물의 재활용으로 인한 비용 절감뿐만 아니라 폐기물 처리에 따른 주변의 환경 개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 제지공장에서 제지회가 되기 이전의 단계인 제지 슬러지의 공학적 특성 및 활용방안에 대해서는 비교적 많은 연구가 진행되어 왔으나(Moo-Young과 Zimmie, 1996 ; Kraus, 1997), 제지회의 활용에 대한 연구는 활발히 이루어지지 않는 실정에 있다.

따라서, 본 연구에서는 산업폐기물인 제지회를 성토재 등의 건설재료로 활용할 경우 제지회 기초지반의 지지력 특성을 파악하기 위하여 중력수준과 기초폭을 변화시켜 가면서 모형실험을 실시하였다. 모형실험결과는 기존의 지지력 이론 및 비선형 탄소성구성모델을 이용한 유한차분법에 의한 수치해석 결과와 비교·분석하였다.

2. 지지력 이론

소성이론에 근거한 Prandtl(1924)의 해법은 기초저면 윗부분의 토피하중은 무시하고, 점착력 c 와 내부마찰각 ϕ 를 갖는 완전 강소성체로 가정하여 해석하였다. Prandtl은 지반의 파괴영역을 주동영역과 수동영역은 변형이 없는 강체로 가정하고, 방사전단영역은 소성변형이 발생하는 것으로 가정하여, 세장기초의 극한지지력 q_u 을 다음과 같이 나타내었다.

$$q_u = \frac{c}{\tan \phi} [e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) - 1] \quad (1)$$

Prandtl의 이론식은 점착력이 없는 지반에서는 지지력이 없는 것이 되므로 불합리하다. 따라서, Taylor는 식(1)의 $\frac{c}{\tan \phi}$ 에 $\gamma \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})$ 를 고려하여 다음과 같은 보정식을 제안하였다.

$$q_u = [c \cot \phi + \frac{\gamma B}{2} \tan(45 + \frac{\phi}{2})] [e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) - 1] \quad (2)$$

Terzaghi(1943)는 Prandtl의 소성파괴이론을 확장하여 전반전단파괴면을 제안하고, 근입깊이 부분을 상재하중으로 가정한 극한지지력을 유도하였다. 췌기 자유체에 작용하는 힘의 평형관계를 이용하여 전반전단파괴시 극한지지력 q_u 공식은 다음과 같다.

$$q_u = cN_c + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_r + \gamma_2 D_f N_q \quad (3)$$

Meyerhof(1951)는 무한장 기초의 굴착면 위의 기초지반 내에 발생할 수 있는 전단응력을 고려하여 극한지지력을 식(4)와 같이 제안하였으며, 형상계수, 근입깊이계수, 경사계수 등을 고려하였다.

$$q_u = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_r + \gamma_2 D_f N_q \quad (4)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 시료의 물성치

본 연구에 사용한 제지회의 물성치를 나타내면 표 1과 같다. 입도분석 결과 그림 1에 나타낸 바와 같이 이 시료의 #200번체 통과율은 60% 정도이고, 균등계수는 18.75, 곡률계수는 1.33으로 입도분포가 양호하며, 통일분류법으로 MH으로 분류된다. 표준다짐시험결과 제지회의 최대건조단위중량은 0.804gf/cm³, 최적함수비는 65%이다.

그림 2는 최대건조단위중량의 95%로 성형하여 0.5, 1, 2, 3kgf/cm²의 구속압력에서 실시한 삼축압축시험 결과 축차응력과 축변형률의 관계를 나타낸 것으로 최대축차응력

은 약 2.5~4.5%의 축변형률에서 발생하고, 구속압력이 증가할수록 최대축차응력이 발생하는 축변형률이 증가한다. 그림 3은 배수삼축압축 시험결과 응력경로와 파괴점의 관계를 $p-q$ 공간상에 나타낸 것으로 제지회의 내부마찰 각 θ 는 30.4°, 점착력은 0.329kgf/cm²로 평가되었다. 그림 4는 0.5~4.0kgf/cm²의 구속압력에서 실시한 등방압축시험 결과 구속압력에 대한 체적변형률의 관계를 나타낸 것이다.

제지회의 입자모양과 배열상태를 알아보기 위해 주사전자현미경을 이용하여 SEM(Scanning Electron Microscope) 분석을 실시하였으며, 그림 5는 제지회 입자를 3000배로 확대한 것으로 제지회는 입자들이 서로 불규칙하게 엉켜 있는 형태로 둥근 모양의 작은 입자에서부터 박판 모양의 비교적 큰 입자들이 불규칙하게 분포하고 있으며, 입자사이에 많은 간극이 존재함을 알 수 있다.

표 1. 제지회의 물리적 특성

G _s	PI	USCS	$\bar{\gamma}_{dmax}$ (gf/cm ³)	w_{opt} (%)	k(cm/sec)
2.12	22.4	MH	0.804	65	3.10×10^{-4}

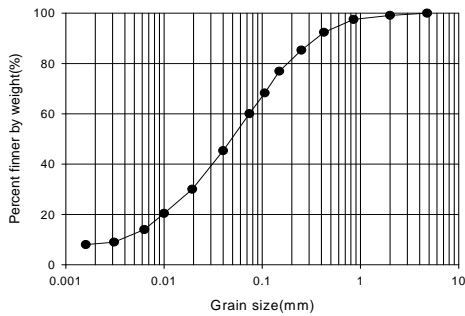


그림 1. 제지회의 입도분포곡선

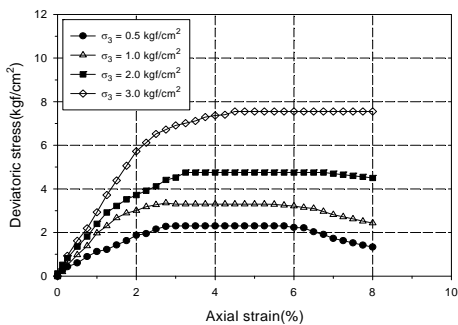


그림 2. 축차응력-축변형률 곡선

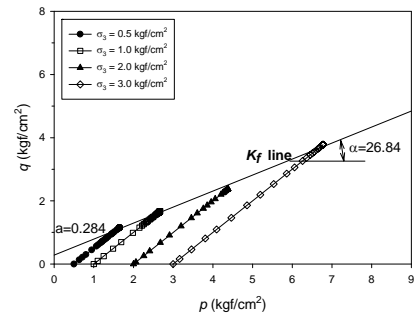


그림 3. p-q 곡선

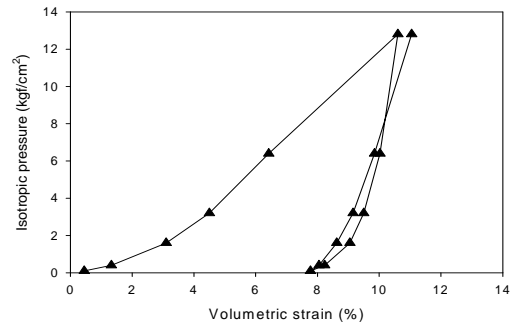


그림 4. 등방압축시험 결과



그림 5. 제지회의 입자구조

3.2 원심모형실험

3.2.1 실험장치 및 기구

3.2.1.1 원심모형시험기

본 연구에서 사용한 원심모형시험기의 개요도는 그림 6과 같으며, 최대원심가속도는 200g-level, 최대용량은 25g·ton으로 실험가능한 모형토조의 최대크기는 500×500×300mm이고, 중심축에서 힌지까지의 거리가 920mm, 스윙바스켓 저면까지의 거리는 1280mm로 제작되었다.

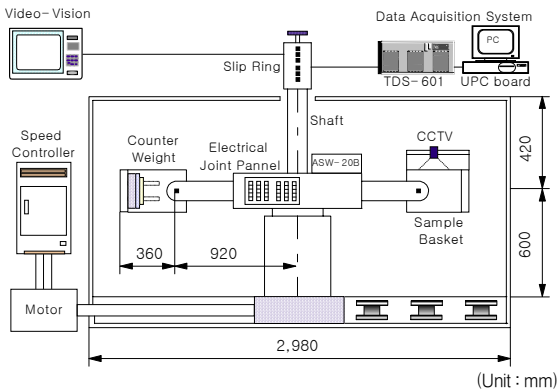


그림 6. 원심모형시험기의 개요도

3.2.1.2 모델박스

2차원 평면변형률 조건에서 실험하기 위한 모델박스는 그림 7과 같이 3면과 밑면은 두께 3mm의 스테인레스로, 전면은 25mm 두께의 투명 아크릴판으로 제작하였으며, 모델박스의 크기는 길이 540mm, 높이 495mm, 폭 205mm이다.

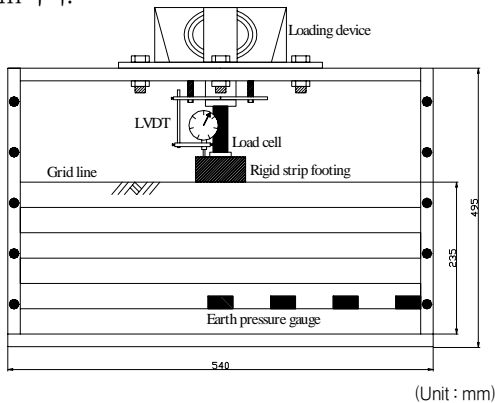


그림 7. 모델박스의 개요도

3.2.1.3 하중재하장치 및 측정장치

제지회로 형성된 모형지반상에 설치한 모형기초에 수직 하중을 가하기 위하여 하중재하장치를 사용하였으며, 이 하중재하장치는 모터에 의한 재하와 제하의 조절이 가능하고, 일정한 재하속도를 유지하기 위한 speed controller가 장착되어 있다. 모형기초지반에 가해진 하중과 변위를 측정하기 위하여 로드셀과 LVDT를 사용하였다. 실험에서 사용한 로드셀의 용량은 1ton이며, LVDT는 최대 30mm까지 측정이 가능하다. 또한, 재하에 따른 지반내의 수직토압을 측정하기 위하여 4개의 토압계를 사용하였다. 실험중 계측기로부터의 자료는 TDS 601 data logger를 이용하여 측정하였다.

3.2.2 실험방법

본 연구에서 모형실험은 기초폭과 중력수준을 변화시키면서 총 6회의 실험을 실시하였다. 모형기초는 재하하는 동안 변형을 방지하기 위하여 고강도 알루미늄 강성기초를 사용하였으며, 기초폭은 모형실험의 경계조건을 고려하여 3, 4cm로 결정하였다. 중력수준은 1, 20, 40g-level의 조건에서 수행하였다. 모형실험은 다음과 같은 과정, 즉, 지반형성(토압계설치), 모델박스를 스윙바스켓에 설치, 하중재하장치 및 로드셀과 LVDT 설치, 일정 중력수준까지 원심가속후 기초상에 하중재하의 순서로 실시하였다. 본 실험에서 모형지반은 최적함수비에서 최대건조단위중량의 95%로 충당함을 하여 형성하였다. 예비실험결과 한 층의 두께를 3cm로 하는 경우 비교적 균일한 지반을 형성할 수 있어 다짐시 한 층의 두께는 3cm로 하여 형성하였다. 기초의 하중재하에 따른 지중응력 변화를 측정하기 위하여 사용한 토압계는 직경 2.5cm, 높이 1.0cm, 최대용량이 2kgf/cm²인 토압계와 직경 5.0cm, 높이 1.0cm, 최대용량이 20kgf/cm²인 토압계를 사용하였다. 토압계 설치위치는 그림 6에 나타난 바와 같이 깊이 20cm 지점에서 기초직하부와 기초중심에서 7, 14, 21cm 떨어진 지점에 설치하였다.

4. 수치해석

4.1 토질매개변수 결정

수치해석에서 사용한 제지회 기초지반재료의 물성치는 삼축압축시험 및 등방압축시험결과로부터 구하였으며, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 그림 8은 등방압축시험의 결과로부터 $v-\ln p$ 공간상에 정규압밀선과 팽창선을 도시한 것으로 정규압밀선의 기울기 λ 는 0.053, 팽창선의 기울기 χ 는 0.016으로 평가되었다. 그림 9는 평균응력과 최대축차응력의 관계를 $p-q$ 공간상에 나타낸 것으로 제지회의 한계상태선의 기울기인 M 은 1.396으로 평가되었다.

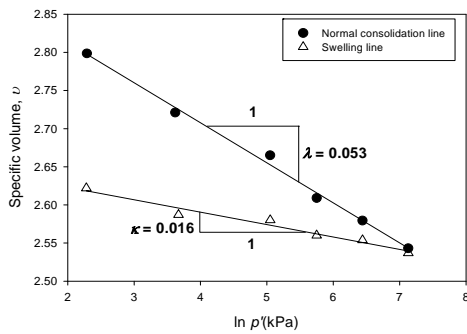


그림 8. 정규압밀선과 팽창선

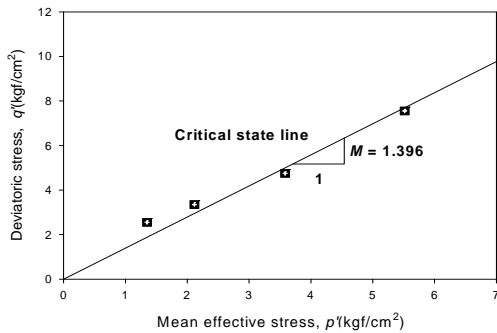


그림 9. 한계상태선의 기울기

4.2 해석조건 및 방법

본 연구에서 모형실험에서 얻어진 결과와 비교분석하기 위하여 유한차분법을 이용하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석은 대부분의 지반공학 문제에 적용할 수 있는 유한차분 프

그램인 FLAC을 이용하였다(Itasca Consulting Group Inc., 1995). 본 프로그램을 사용한 수치해석에서 제지회 모형지반은 수정 Cam-Clay 모델을 이용하였으며(Roscoe와 Poorshasb, 1963 ; Roscoe와 Schofield 등, 1963) 이는 수정 Cam-Clay 모델이 다른 탄소성 구성모델에 비해 매개변수가 적고, 매개변수 결정이 비교적 용이하기 때문이다. 수치해석은 모형실험조건과 동일한 2차원 평면변형률조건에 대하여 해석을 실시하였으며, 20g-level과 40g-level의 경우 원심모형실험에서의 상사법칙을 적용하여 원형축척으로 환산하여 모델링하였다.

그림 10은 모형지반의 해석에 사용된 유한차분망과 경계조건을 나타낸 것으로 해석에 사용된 요소 수는 648개이며, grid point는 700개로 설정하였다. 모형지반과 모델박스 저면에서의 경계조건은 힌지로 지정하여 수직 및 수평방향의 변위를 구속하였고, 양측면에서의 경계조건은 롤러로 지정하여 수평방향의 변위를 구속하였다.

표 2 수치해석에 사용된 물성치

Parameters	Determined value
Slope of normal consolidation line, λ	0.053
Slope of swelling line, χ	0.016
Slope of critical state line, M	1.396
Specific volume on the CSL at $p'=1$	2.918
Poisson's ratio, ν'	0.331
Initial specific volume	2.689
Unit weight of paper ash, γ (kgf/m ³)	1158
Earth pressure coefficient, K_0	0.494

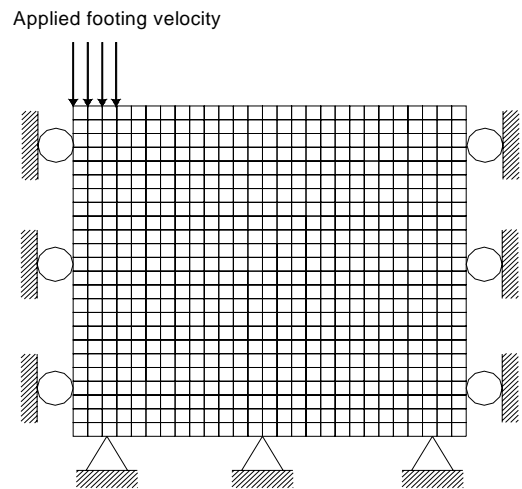


그림 10. 유한차분망 및 경계조건

5. 결과분석 및 고찰

5.1 하중-침하특성 및 극한지지력

그림 11과 12는 모형실험에서 측정된 하중-침하량곡선을 나타낸 것으로 모든 경우에서 약간의 변곡점을 보이지만, 명백한 파괴점이 나타나지 않고 있으며, 하중강도는 기초폭과 g-level이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 중력수준이 증가할수록 극한지지력이 증가하는 요인은 원심력에 따른 모형지반의 자중 증가에 따라 모형기초에 작용하는 구속압력 증가로 연직유효응력 증가에 따른 상대구속압력의 증가에 의한 것으로 판단된다. 그림 11과 12에서 20g와 40g-level인 경우 약 100tf/m² 정도까지는 하중증가에 따라 침하량이 비교적 선형적으로 증가하고 있으며, 그 이후부터는 하중-침하량 곡선의 기울기가 급변하고 있음을 알 수 있다.

그림 13은 1g 모형실험(B=3cm)에서 측정된 하중-침하비 곡선을 수치해석결과와 비교하여 나타낸 것이다. 이로부터 침하비 s/B가 30% 이내에서는 해석치가 실험치에 비하여 작게 나타나지만, 그 이상인 부분에서는 크게 나타나고 있다. 또한, 실험치와 해석치 모두 뚜렷한 변곡점이 나타나지 않는 국부전단 파괴 양상을 보이고 있다.

그림 14와 15는 g-level에 따른 극한지지력의 변화를 실험치와 이론식에 의한 값과 비교한 것으로 기초폭에 관계없이 g-level이 증가할수록 극한지지력이 증가하는 경향을 보이고 있다. 1g상태에서는 이론식에 의한 극한지지력이 실험치에 대하여 24.26~52.08% 정도 과대평가 되었으며, 20g와 40g-level에서의 극한지지력은 Terzaghi 제안식에 의한 극한지지력과 유사하나, Meyerhof 제안식과 Taylor 제안식에 의한 극한지지력은 실험치에 대하여 5.60~15.92% 정도 과소평가되는 것으로 나타났다. 기초폭에 따른 극한지지력의 변화를 실험치와 이론식과 비교해보면, 1g상태에서는 기초폭의 증가에 따라 극한지지력의 증가가 미소하게 나타나고 있으며, 이론식에 의한 극한지지력 변화양상도 실험치와 유사하다. 그러나, 20g와 40g 상태에서 비교한 결과, 기초폭이 증가할수록 극한지지력이 증가하는 경향이 뚜렷하며, 이는 기초폭이 증가함에 따라 동일한 하중에 대하여 단위면적에 작용하는 하중강도의 변화에 의한 모형지반에 전달되는 하중강도의 감소로 인한 지지력의 증가에 영향이 있다고 판단된다.

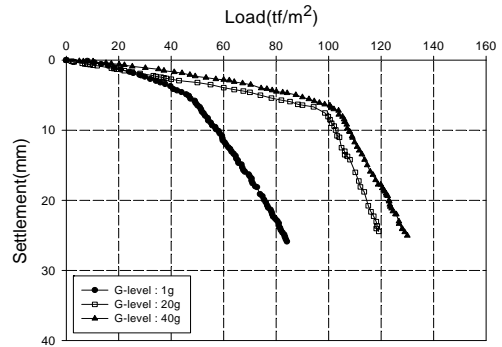


그림 11. 하중-침하량 곡선(B=3cm)

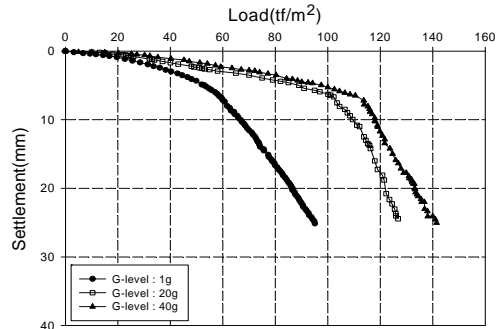


그림 12. 하중-침하량 곡선(B=4cm)

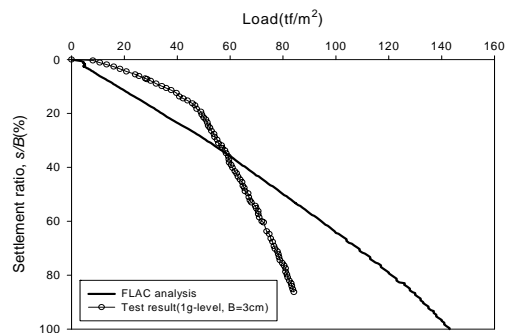


그림 13. 하중-침하비 곡선의 비교
(1g-level, B=3cm)

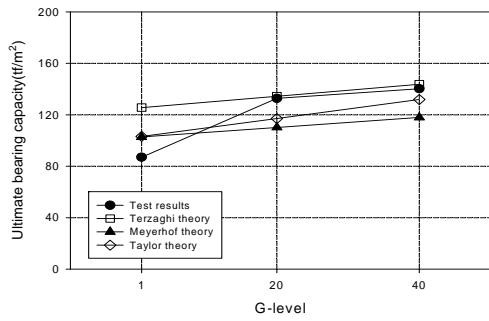


그림 14. G-level에 따른 극한지지력(B=3cm)

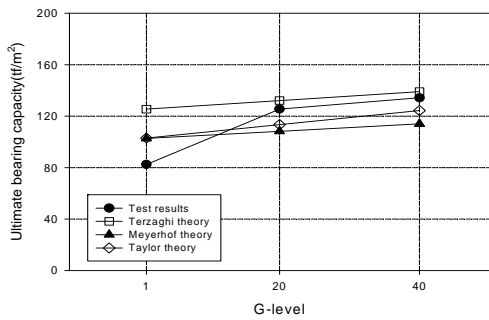


그림 15. G-level에 따른 극한지지력(B=4cm)

5.2 이격거리별 수직토압분포

그림 16~그림 19는 1g와 40g-level에서 측정된 하중증가에 따라 측정된 수직토압의 관계를 나타낸 것이다. 하중재하에 따른 지반의 수직토압 분포는 재하초기에 급격히 증가하는 경향을 보이며, 이후 일정한 값으로 수렴하고 있다. 또한, g-level이 증가할수록 수직응력의 증가폭이 증

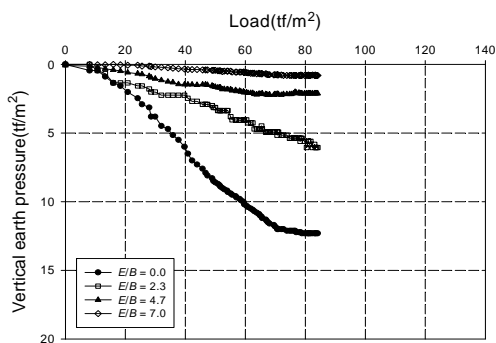


그림 16. 하중 수직토압 곡선(B=3cm, 1g-level)

가하고, 이격거리가 증가할수록 수직응력이 감소되므로 기초에 재하되는 하중의 영향이 이격거리가 길어질수록 감소됨을 알 수 있다.

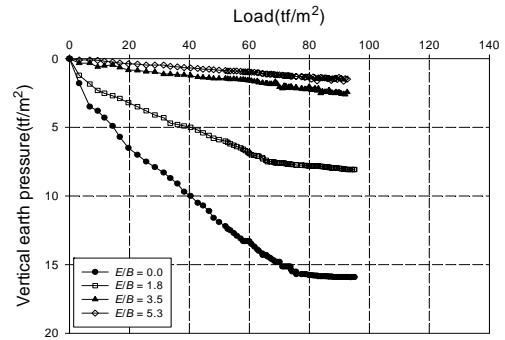


그림 17. 하중 수직토압 곡선(B=4cm, 1g-level)

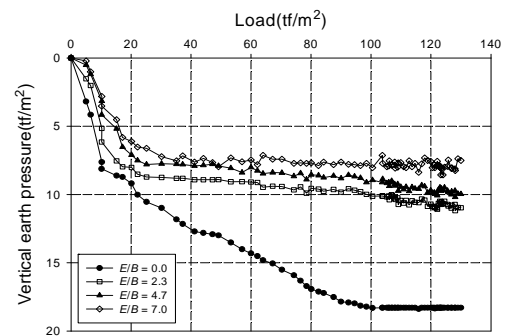


그림 18. 하중 수직토압 곡선(B=3cm, 40g-level)

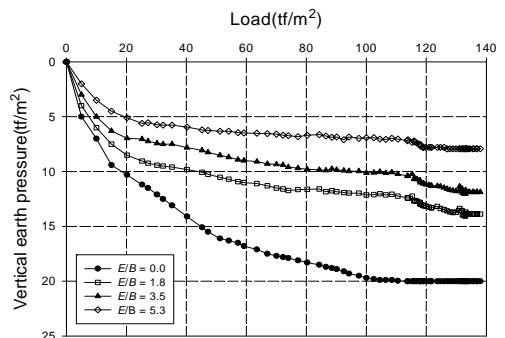


그림 19. 하중 수직토압 곡선(B=4cm, 40g-level)

그림 20과 21은 지표면에서 20cm 위치에 설치한 토압계로부터 측정된 수직토압과 수치해석을 통하여 얻어진 결

과를 이격거리에 따라 나타낸 것이다. 이로부터 기초폭에 관계없이 이격거리가 증가할수록 하중증가에 따른 지중응력이 현저히 감소하여 기초에서 수평거리가 멀어질수록 재하된 하중에 대한 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 기초폭이 3cm인 경우 E/B가 7.0 이상에서는 하중증가에 대한 지중응력의 증가에 영향이 거의 없는 것으로 판단된다. 또한, 측정결과를 해석치와 비교하면, g-level의 변화에 관계없이 이격거리가 적을 때는 해석치가 실험치에 비하여 약 7~15% 정도 과대평가되는 것으로 나타났으나, 이격거리가 증가함에 따라 실험치와 해석치가 거의 일치하는 경향을 보이고 있다.

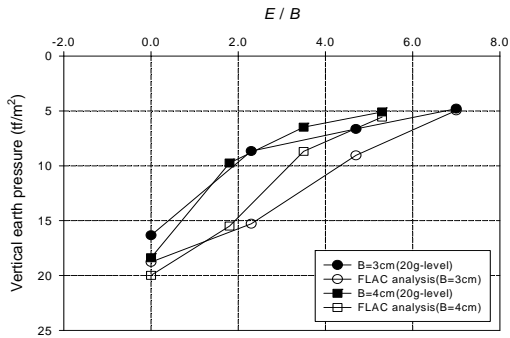


그림 20. 수직토압 분포(20g-level)

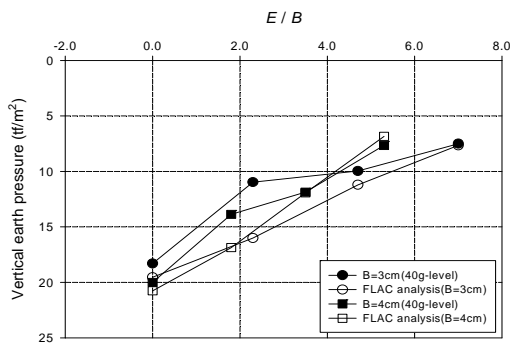


그림 21. 수직토압 분포(40g-level)

5.3 지반변형특성

그림 22~27은 지표면으로부터 1, 4, 7cm 깊이에서 측정된 지반의 수직변위 분포를 수치해석 결과와 비교하여 나타낸 것으로 20g와 40g-level에서는 최종단계 재하후

깊이에 따른 수직변위를 측정할 수 없어 1g 모형실험결과만을 나타내었다. 이로부터 지표면으로부터 깊이가 증가할수록 변위가 감소하며, 기초폭이 증가함에 따라 변위가 증가하며, 하중재하에 의한 영향은 기초직하부에 집중되는 것으로 나타났다. 그림 22로부터 E/B=1.3 정도까지는 하중재하로 인하여 침하가 발생하며, E/B=1.3~4까지는 융기가 발생하며, 그 이상에서는 거의 변위가 발생하지 않음을 알 수 있다. 측정결과를 해석결과와 비교하면, 기초지면 부근에서는 실험결과가 수치해석 결과보다 다소 크게 나타났지만, E/B=3.5~4 이상에서는 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그림 22~그림 27로부터 지표면으로부터 깊이 4cm 이상, 이격거리 E/B=5.0 이상에서는 하중재하에 의한 지반의 수직변위는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

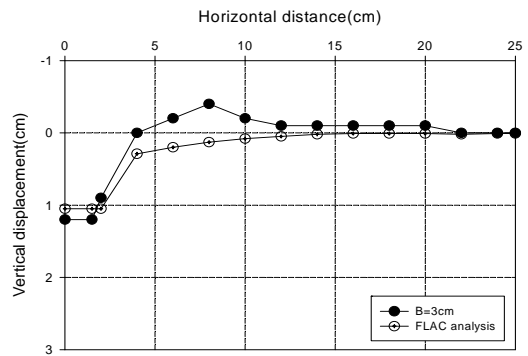


그림 22. 수직변위 분포(B=3cm, Depth=1cm)

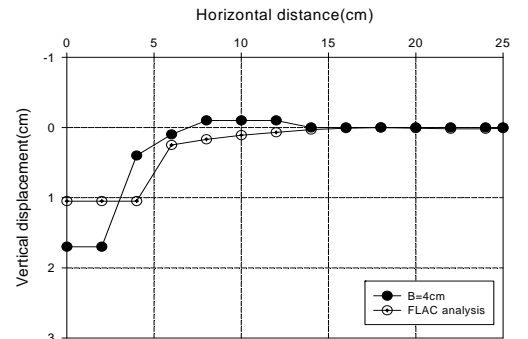


그림 23. 수직변위 분포(B=4cm, Depth=1cm)

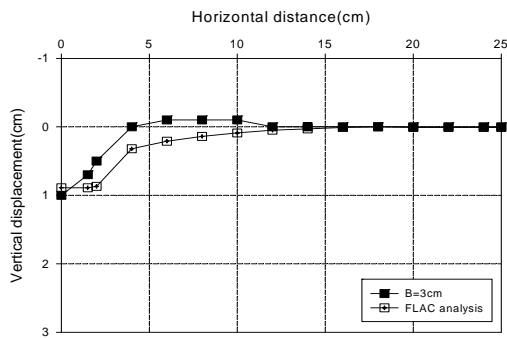


그림 24. 수직변위 분포(B=3cm, Depth=4cm)

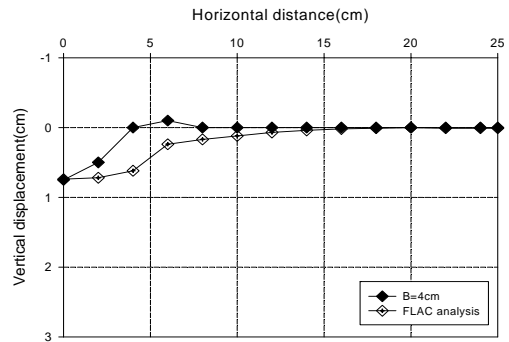


그림 27. 수직변위 분포(B=4cm, Depth=7cm)

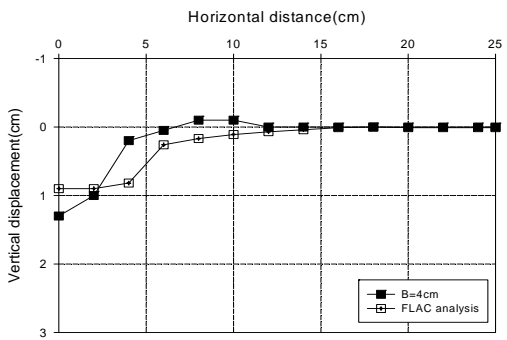


그림 25. 수직변위 분포(B=4cm, Depth=4cm)

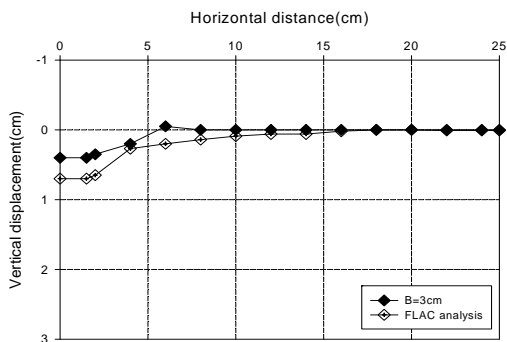


그림 26. 수직변위 분포(B=3cm, Depth=7cm)

6. 결론

본 연구에서는 산업폐기물인 제지회를 성토재로 활용할 경우 제지회의 지지력 특성을 파악하기 위하여 모형실험을 실시하였다. 실험결과는 기존의 지지력 이론 및 수치해석 결과와 비교·분석하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험결과 하중-침하특성은 침하비(s/B)가 약 25~30%에서 변곡점이 보이지만 뚜렷한 파괴점이 없는 국부전단파괴 양상을 보이며, g -level과 기초폭이 증가할수록 하중강도가 증가하며, 해석 결과가 전반적으로 실험결과를 과대평가하고 있다.
- (2) 실험에서 결정된 극한지지력을 이론치와 비교한 결과 기초폭과 g -level이 증가할수록 극한 지지력은 증가하며, Terzaghi 이론식의 결과가 실험치와 유사한 것으로 나타났다.
- (3) 하중재하에 따른 수직토압 분포는 이격거리가 증가할수록 급격하게 감소하며, 기초폭과 g -level의 증가에 따라 기초 직하부에서의 수직응력에 대한 영향이 증가함을 알 수 있었다. 또한, 수치 해석 결과는 실험치를 7~15% 정도 과대평가하는 것으로 나타났다.
- (4) 모형실험 및 수치해석 결과 깊이에 따른 지반의 수직 변위는 기초 직하부에서 가장 크게 발생 하며, 이격거리가 증가함에 따라 크게 감소하며, 해석결과는 기초 저면 부근의 수직변위에 대하여 과소평가하였다. 또한, 깊이 4cm 이상, 이격거리 $E/B=5.0$ 이상에서는 하중재하에 의한 지반의 수직변위는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. (접수일자 : 2001. 4. 4.)

참 고 문 헌

1. 유남재, 홀츠, 강인구(1998), “연약 점성토위 사질토에 위치한 기초 거동”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, Vol.18, No.III-4, pp.567~582.
2. 이처근, 안광국, 김민호, 허열(2000), “산업폐기물 제지회의 지반공학적 특성 및 활용가능성”, 한국 지반환경공학회 논문집, 제1권, 제1호, pp.19~26.
3. 한국제지공업연합회(1999), “제지산업 폐기물 발생 및 처리현황 조사보고서”, pp.1~12.
4. Das, B.M.(1998), “Principles of Foundation Engineering”, PWS Publishing, pp.152~217.
5. Desai, C.S., and Siriwardane, H.J.(1984) “Constitutive Laws for Engineering Materials with Emphasis on Geologic Materials”, Prentice-Hall, pp.204~343.
6. Moo-Young, H.K., and Zimmie, T.F.(1996), “Geotechnical Properties of Paper Mill Sludge for Use in Landfill Cover”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.122, No.9, pp.768~775.
7. Kraus, J.F., Benson, C.H., and Wang, X.(1997), “Laboratory and Field Hydraulic Conductivity of Three Compacted Paper Mill Sludges”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, Vol.123, No.7, pp.654~662.
8. Itasca Consulting Group Inc.(1995), “FLAC Version 3.3, Vol. I: User’s Manual”.
9. Itasca Consulting Group Inc.(1995), “FLAC Version 3.3, Vol. II: Appendices”.
10. Roscoe, K.H., and Poorshasb, H.B.(1963), “A Theoretical and Experimental Study of Stress-Strain in Triaxial Compression Tests on Normally Consolidated Clays”, Geotechnique, Vol.13, No.1, pp.12~28.
11. Roscoe, K.H., Schofield, A.N., and Thurairajah, A.(1963), “Yielding of Clays in State Wetter than Critical”, Geotechnique, Vol.13, No.3, pp.211~240.