

경량성토 모형시험을 통한 연약지반상의 성토제체의 거동

Behavior of Soft Ground Throughout Mock-up Test Using Low Self Weight Banking Method

김 상 철^{1)*}

Kim, Sang Chel

Abstract

This study aims at evaluating feasibility of Bottom ash-mixed Foam Cement Banking(BFCB) Method on the enhancement of soft soil, which is developed to reduce self-weight of banking by applying bottom ash and foam to cement slurry. In order to measure the behavior of soil when BFCB layer was covered to soft ground, a testing equipment for mock-up test was fabricated and phased loads were applied up to measurement of yielding and ultimate strengths as well as movement of ground particles. In addition, these measured values such as settlement and heaving were compared with ones of surface-hardening method prevailing on soil improvement. As the result through mock-up test, BFCB showed lower values of ground deformation, while wider range of deformation was observed in compare to the other method. And settlement and heaving were measured lower, which implies the method developed is very effective to applicability of soft ground.

Keywords : Soft ground, BFCB, Bottom ash, Foam, Equipment for soil mock-up test, Settlement, Heaving

1. 서론

연약지반 지역이나 산악지역과 같은 한계지역에 적용되는 지반공학기술은 크게 지반을 치환하는 기술, 개량하는 기술, 보강하는 기술 그리고 구조물을 이용하는 기술 등이 있으며, 각 기술의 대표적인 경우는 구조물(하중)에 맞추어서 지반을 다지는 기술, 지반 속에 드레인을 타설하고 탈수시켜서 강도의 증가를 꾀하는 기술, 경화제를 흙과 섞어서 고결시키는 기술, 토목섬유 등을 적용하여 보강하는 기술, 지반 속으로 말뚝을 박아 넣음으로써 그 위에 놓이는 하중을 지탱하는 기술 등이 있다 (한국지반공학회, 1995; 한국토지개발공사, 1987).

상기의 기술들은 주로 하중을 받는 지반이나 하중을 받는 대상체에 대한 기술이며, 근래에는 구조물의 대형화, 자원의 유효 이용, 공해 방지, 공기 단축 등 사회적 요구에 따라 재료의 선정에 있어서 지금까지 중요 인자이었던 경제성이외에도 재료의 경량성, 높은 강도, 내구성, 공해의 저감 등 다면적인 면에서 이루어지고 있는 경우가 많아졌다 (미래이엔씨, 2005). 이와 같은 사회적 요구로 최

근에 하중을 경감시키기 위한 공법인 경량성토공법이 활성화되고 있다 (천병식 등, 1996).

경량성토공법은 성토 자체의 하중을 가볍게 함으로써 통상적인 성토보다도 원래의 지반에 대한 영향을 줄일 수 있으며 지반의 처리도 될 수 있는 대로 줄여서 성토 축조를 가능하게 하는 것이다. 이 공법에서는 사용되는 재료에 따라 여러 공법이 있을 수 있으나, 본 연구에서는 석탄 화력 발전소에서 발생하는 다공성의 경량골재인 바텀애시와 시멘트를 주원료로 하는 슬러리에 기포제를 혼합하여 발포시킨 기포혼합형 경량성토공법(Bottom ash-mixed Foam Cement Banking Method: BFCB)을 개발하였으며 이를 연약지반에 적용하였을 때 그 효과를 검토하고자 하였다.

일반적으로 연약지반 상부에 성토를 행하였을 때 가장 중요하게 나타나는 지반의 거동은 측방유동이므로 (久野 悟地郎, 1995; 稻田 倍穂, 1996), 본 연구에서는 연약지반 상부에 본 공법을 적용함으로써 하중을 경감시켜 측방유동을 방지하는 효과를 확인하고자 하였다. 모형시험에서 단계적으로 하중을 증가시켜 지반의 변형거동을 관측하고, 기존 연약지반처리기술에 사용된 표층고화공법의

1) 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수

* Corresponding author : schkim@hanseo.ac.kr 041-688-0182

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

결과와 본 실험결과를 비교함으로써 제안한 기술의 성과와 효과를 평가하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

2.1.1 지반 시료

본 모형시험에 사용된 시료는 인천광역시 남항 부근의 해안지역에 퇴적되어 있는 준설향성점토를 채취하여 사용하였으며, 채취한 시료에 대한 토질시험 결과는 Table 1과 같다. 채취 시료의 자연함수비(W_n)는 45.8%이며 액성한계 35.4%, 소성지수가 18로 액성 상태를 나타내고 있으며, 통일분류법(USCS)에 의해 흙을 분류하면 CL로 분류된다.

2.1.2 경량성토층

경량성토층은 사전 배합시험 결과에 따라 단위체적중량을 약 1.0 ton/m^3 을 목표로 하여 골재 대체재로써 바텀에서 228 kg과 1종 포틀랜드 시멘트 380 kg을 계량하여 믹서에서 1분간 건비빔한 후에 배합수인 물을 228 kg 첨가하고 2분간 믹싱하였다. 그 후 기포제 0.517 kg과 희석수 14,159 kg을 기포 발생기 내에 넣고 혼합하여 생성시킨 기포를 이 슬러리화된 모르타르에 혼입하여 1분간 혼합한 후 제작하였다. 이와 같이 제작된 경량성토층의 특성은 Table 2와 같다.

2.2 모형 시험장치 제작

모형토조의 규격은 폭 900 mm, 높이 500 mm, 길이

Table 1 Results of soil tests

Water content (W _n)	Specific gravity (G _s)	Liquid limit (LL)	Plastic index (I _p)	#200 % passing	Uniformity Coefficient (C _u)	Classification (USCS)
45.8%	2.68	35.4	18	74.3%	18.2	CL

Table 2 Characteristics of BFCB

Desired unit weight	Obtained unit weight	Air content	Slump flow	Ratio of water absorption (14 days)	App. specific gravity (14 days)	Compressive strength (14 days)
1.00 ton/m ³	1.01 ton/m ³	54.0%	187 mm	18.37%	0.86 ton/m ³	3.34 MPa

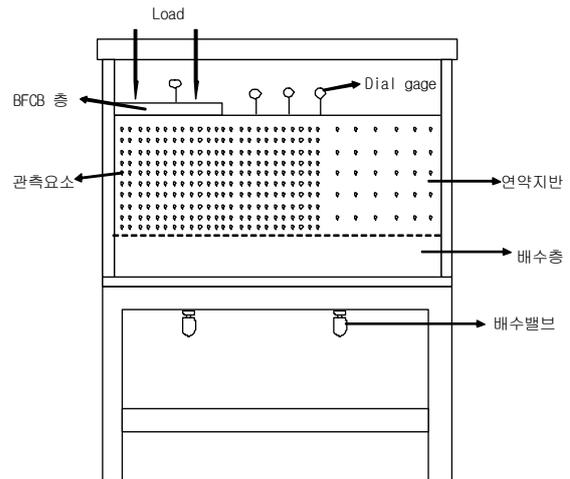


Fig. 1 Configuration of mock-up test equipment for BFCB

300 mm의 크기로 제작하였으며, 재하 및 지반의 거동을 전면에서 관찰하기 위하여 토조 전·후면에는 12 mm 두께의 투명 아크릴 판을 부착하였다. 또한, 실험의 계측오차를 줄이고 실제 지반조건과 비슷한 소성평형상태의 재현과 토조 측면의 마찰을 줄이기 위하여 토조 내부는 오일을 바르고 HDP 필름을 부착하였으며, 고무패킹과 실리콘을 병행하여 누수를 차단하였다. 실험초기에 점성토의 자중압밀에 필요한 배수를 위하여 기기 하부 양측에는 10 mm 드레인 파이프를 설치하고 개폐를 할 수 있도록 하였다. 토조 내부는 300 mm 깊이의 연약지반 모형을 조성시키고 좌측 지표부에 폭 300 mm, 두께 30 mm의 경량성토를 제작하여 안치할 수 있게 하였으며 경량성토의 상부에 하중재하판을 설치하였다. Fig. 1은 제작된 모형시험기의 개요도를 나타낸 것이다.

2.3 실험 방법

2.3.1 모형지반 형성과 경량성토 공시체 제작

모형지반을 형성시키기에 앞서 점성토를 자중 압밀시킬 때의 배수를 위하여 토조 하부는 굵은 쇄석, 잔 쇄석, 모래, 부직포 순으로 배수층을 포설하였다. 또한, 모형지반 형성을 위한 해안 점성토에서 조개껍질 및 이물질 제거 후 가수하면서 교반하여 액성 상태의 시료를 제작하였고, 제조된 시료를 토조 내에 투입하여 약 30일간 자중 압밀시켰다. 앞서 준비한 경량성토체는 별도로 준비한 길이 300 mm, 폭 300 mm, 높이 30 mm의 몰드에 넣고 28일간 양생하였다.

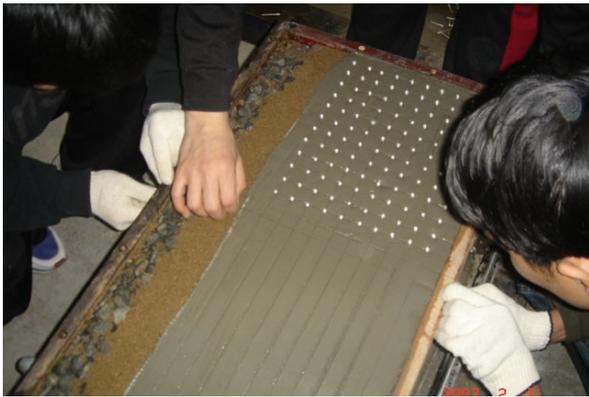


Photo 1 Installation of signposts

2.3.2 지반 거동 관측용 요소 설치 및 모형 토조 거치
 모형지반의 변형거동을 측정하기 위하여 모형지반 전
 면에 백색 유성페인트로 착색한 면봉을 오일 코팅 후 시
 료 표면에 설치하였으며, 설치간격은 주요 거동이 예상되
 는 구역에는 중횡방향 25 mm 간격으로, 그 외 구역에는
 중횡방향으로 50 mm 간격으로 일정하게 하여 표점을 마
 려하였다 (Photo 1).

표점 설치가 완료된 후 전면 아크릴판을 체결하여 모형
 토조를 받침대와 함께 재하 장치대로 이동, 설치하였다.

2.3.3 상부의 거동 관측기기 설치 및 하중재하

사전 제작하여 소요 양생기간이 경과한 경량성토 공시
 체를 모형 토조 좌측 상단부에 올려놓고 Photo 2와 같이
 모형 지반 표면상부에 지반 변형 거동 측정용 게이지를
 설치하였다. 이 때 게이지의 설치위치는 지반의 융기가
 가장 클 것으로 예상되는 지점과 양측으로 50 mm 위치
 의 두 개 지점으로 하고, 또 경량성토 공시체 상부의 중앙
 지점에 게이지를 설치하여 경량성토층의 침하량을 측정
 하였다. 재하하중은 단계별로 0.0055 N/mm 씩 일정한
 시간 간격으로 단계별 재하를 실시하였다.

2.3.4 지반 거동 관측

모형지반 표면의 융기량과 경량성토층의 침하량은 설
 치한 게이지로 각 측정마다 측정하고, 토조 전면의 투명
 아크릴판 외측면에는 vinyl sheet를 부착하여 각 표점의
 이동상황을 하중단계마다 점을 찍어 표시하였다. 또한,
 모형 토조 전방에는 카메라를 설치하여 하중단계별 표점
 의 거동을 촬영하였다.

각 변위량의 측정은 단계별 하중재하 후 1, 2, 4, 8,
 16, 32, 60분마다 게이지의 눈금을 읽어 기록하며 경량



Photo 2 Installation of gauges

성토층이 파괴되는 하중단계에서 재하를 종료하였다.

3. 결과 분석 및 고찰

모형지반에 대해 하중단계별 변형거동을 측정하여 그
 변화를 시각적으로 촬영한 결과는 Photo 3과 같다.

모형시험 결과에서의 경량성토층의 파괴 형태는 재하
 하중에 의하여 발생된 휨에 의한 파손 형태로 나타나고
 있어 경량성토 공시체의 인장강도 특히 휨 인장강도는 설
 계 시에 중요 인자임을 알 수 있다. 하지만, 지반의 측방
 유동이나 공시체의 휨을 유도하는 가장 큰 요인은 재하하
 중이므로 재하하중의 크기가 가장 중요하다고 할 수 있
 다. 따라서 본 연구에서의 하중 단계별 최종 침하량과 최
 종 지반 융기량, 최종 파괴단계의 하중재하인 14 단계에
 서의 성토층 중앙의 직하부에서 심도별 침하량을 본 연구
 팀이 동일한 조건으로 실험한 표층고화 공법에서의 결과
 와 비교 평가하였다.

3.1 관측요소의 거동

지반 내부의 거동을 관측하기 위하여 설치한 관측요소

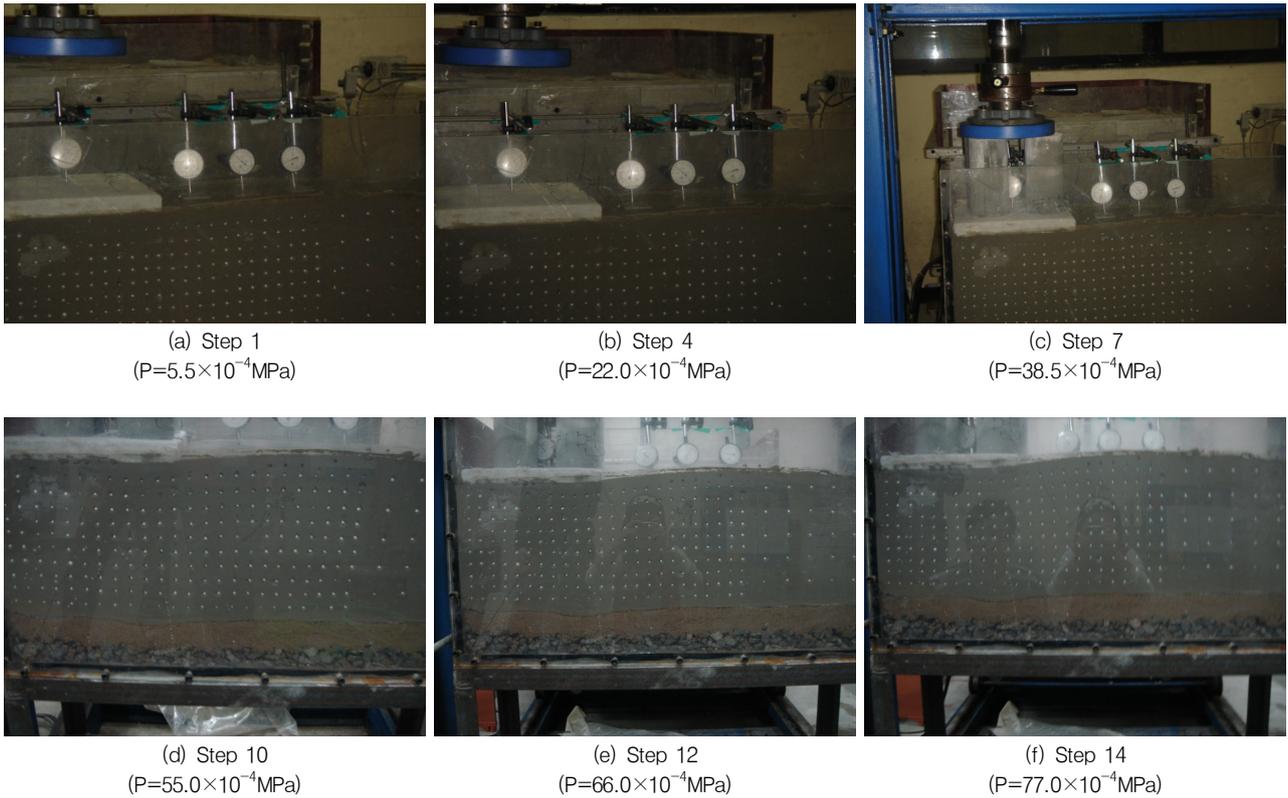


Photo 3 Movement of signpost associated with loading steps

(면봉)는 Photo 3(a)의 최초위치에서 Photo 3(f)의 최종 위치로 각각 이동하였으며, 이들의 이동 경로는 모형지반에서 지반 활동면이나 지반변형영역을 의미하게 된다.

Photo 3의 관측 요소 이동 상태를 관찰하여 보면, 성토층 중앙부 직하부 지반에서는 지반변형이 직하방향으로, 성토층 단부 하부지반에서는 지반변형이 수평방향으로 측방 유동하였으며, 성토층 외곽 원 지반에서는 지반변형이 상 방향으로 용기하였음을 알 수 있다.

또한, 지반변형의 범위는 표층고화 공법보다 본 공법에서 크기는 작으나 깊고 넓어지는 것이 관찰되었는데, 이는 경량성토층이 강도가 크므로 하중지지능력이 커진 것에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 경량성토층으로 연약 지반에 성토하면 일반토사 성토나 표층고화 공법보다 하중지지능력이 크고, 지반 변형 크기는 작지만 지반변형 영역은 확대된다는 것을 알 수 있다.

3.2 하중-침하량

Fig. 2는 본 공법인 경량성토층 상부와 표층고화층 상부에 하중을 재하하고 재하하중에 따라 발생하는 침하량

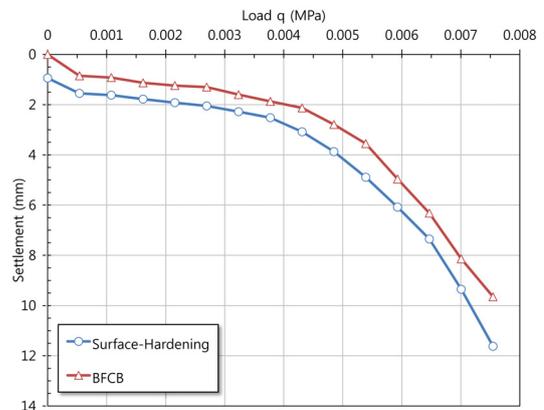


Fig. 2 Load vs. settlement curve

을 도시한 그림이다.

이 그림에 의하면, 초기 재하에서부터 항복하중 재하까지 하중과 침하량 사이에 선형적 관계가 유지되면서 침하량이 비교적 작게 발생되고 있으며, 항복하중 이후에는 침하량이 비교적 크게 발생되고 있음을 보이고 있다. 하중-침하량 관계 곡선은 두 개의 직선부로 구성되어 있으며, 이들 두 개의 직선부 사이의 변곡점 위치를 항복하중 P_y 로 취하면 표층고화공법 모형지반은 0.0043 MPa이고,

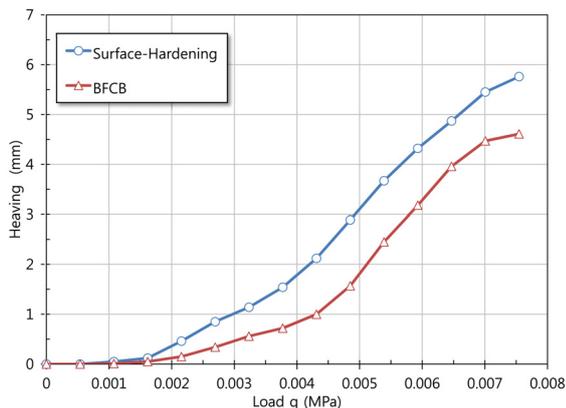


Fig. 3 Load vs. heaving curve

경량성토 모형지반은 0.0050 MPa가 됨을 알 수 있다.

극한하중(P_u)은 표층고화층과 경량성토층이 파괴된 마지막 단계하중으로 표층고화층은 약 0.0075 MPa에서 파괴되었으므로 이 값으로 할 수 있으나, 경량성토층은 휨인장강도가 0.59 MPa로써 경량성토층의 파괴가 아니라 원 지반의 파괴에 중점을 두는 것이 타당할 것으로 생각된다.

3.3 하중-용기량

Fig. 3은 하중과 지반 용기량의 관계를 나타낸 그림이며, 용기량은 Fig. 1의 가운데 게이지의 계측 결과이다. 앞서 하중과 침하량 사이의 관계에서와 같이 지반의 용기량도 항복하중이 작용할 때까지는 크게 발생하지 않았으나, 항복하중 이후부터는 지반의 용기량이 크게 발생하였다.

하중재하 초기에는 표층고화 모형지반과 경량성토 모형지반의 지반 용기량이 비슷하게 발생하지만, 항복하중 이후부터는 표층고화 모형지반이 크게 발생하고 최종단계에서 표층고화 모형지반의 용기량이 5.8 mm이고, 경량성토 모형지반의 용기량이 4.6 mm로 나타났다.

3.4 심도-침하량

Fig. 4는 심도별 최대 침하량 관계를 도시한 결과이며, 침하량은 표층고화층 및 경량성토층 직하부에서 가장 크게 발생하며, 심도가 깊어짐에 따라 선형적으로 감소하여 경량성토층의 폭에 해당하는 250 mm 심도에서 0에 근접하였다.

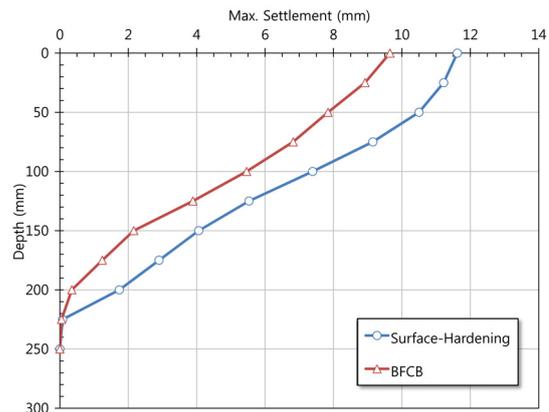


Fig. 4 Max. settlement vs. depth curve

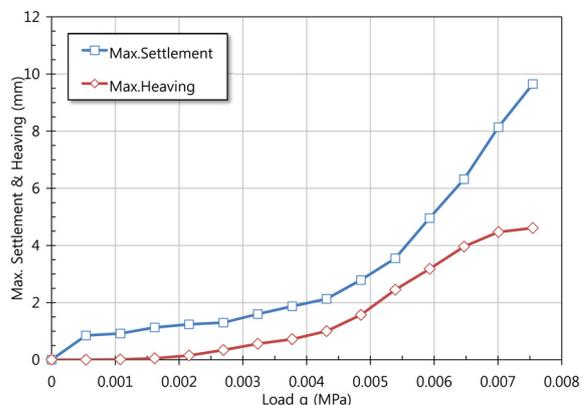


Fig. 5 Max. settlement and heaving vs. load in BFCB

3.5 침하량-용기량

경량성토 모형시험에서 발생된 최대 침하량(S_{max})과 최대 용기량(δ_{max})의 관계를 도시하면 Fig. 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 하중재하 초기에는 두 값 간에 큰 차이를 나타내지 않지만, 재하하중이 커짐에 따라 점차 그 차이가 크게 발생하여 2.0배 이상의 차이를 보이고 있다. 이와 같은 현상이 발생하는 원인은 원지반의 함수비가 액성한계이상(약 2LL)으로 원지반이 액성거동 특성을 나타내어 경량인 경량성토층에 부력을 작용시키기 때문에 기인된 것으로 판단된다.

3.6 조성지반의 비배수전단강도

표층에 대하여는 Toe-vane test를 사용하고, 내부는 Potable Vane Test를 사용하여 조성된 지반에 모형 연약 지반의 비배수 전단강도를 측정하였으며, 그 시험 과



Photo 4 Measurement of undrained shear strength on the surface



Photo 5 Measurement of undrained shear strength in the soft soil layer

Table 3 Results of undrained shear strength test

Items	Scheded water content W(%)	Cohesion f_s (kPa)	Measured C_u (kPa)	Adjusted $\mu \overline{C_u}$ (kPa)	Actual water content (%)
BFCB	40%	1.5	12.8	10.98	41.2
Surface-Hardening	40%	1.5	13.0	11.04	39.8

* Correction factor $\mu = 0.96$

정은 Photo 4, 5와 같다.

Potable Vane Test에서의 점착력 보정은 Dummy Test를 병행하여 $\overline{C_u} = C_u - f_s$ 에 대입함으로써 Vane Test 시험시 점착력의 항을 소거하였다. 또한, 점토시료의 소성지수(PI)에 따른 비배수전단강도에 대한 영향을 보정하기 위하여 Bjerrum의 보정계수 μ 를 사용하여 보정된 비배수전단강도를 구하였으며, 각 모형 지반에 대한 비배수 전단강도 시험 결과는 Table 3과 같다.

4. 결론

- (1) 관측 요소의 이동상태를 통해 지반거동을 관측한 결과, 경량성토층 중앙부 직 하부 지반에서는 지반 변형이 직하방향으로, 성토층 단부 하부지반에서는 지반변형이 수평방향으로 측방 유동하였으며 성토층 외곽 원지반에서는 지반변형이 상방향으로 용기하였다.
- (2) 경량성토층으로 연약지반에 성토하면 일반토사 성토나 표층고화 공법보다 강도가 크므로 하중지지 능력이 크고, 따라서, 지반 변형 크기는 작으나 지

반변형 영역은 커지게 된다.

- (3) 초기 재하에서 항복하중 재하까지 하중과 침하량 사이에 선형적 관계가 유지되면서 침하량이 비교적 작게 발생되고 있으며, 항복하중 이후에는 침하량이 비교적 크게 발생되었다.
- (4) 하중-침하량 관계 곡선에서 항복하중(P_y)은 표층 고화 모형지반은 0.0043 MPa 이고, 경량성토 모형지반은 0.0050 MPa이며, 극한하중(P_u)은 표층 고화층은 약 0.0075 MPa, 경량성토층은 휨인장 강도에 해당하는 0.59 MPa로 추정된다.
- (5) 하중-용기량은 하중과 침하량 사이의 관계에서와 같이 항복하중이 작용할 때까지는 크게 발생하지 않았으나, 항복하중 이후 크게 발생하였다. 또한, 지반의 용기량은 하중재하 초기에는 표층고화 모형지반과 경량성토 모형지반이 비슷하게 발생하지만, 항복하중 이후부터는 표층고화 모형지반이 크게 발생하고 최종단계에서 표층고화 모형지반의 용기량은 5.8 mm 이고, 경량성토 모형지반의 용기량은 이 보다 작은 4.6 mm로 측정되었다.
- (6) 심도별 최대 침하량은 표층고화층 및 경량성토층 직하부에서 가장 크게 발생하며, 심도가 깊어짐에 따라 선형적으로 감소하여 경량성토층의 폭에 해당하는 250 mm 심도에서 0에 근접하였다.
- (7) 최대 침하량(S_{max})과 최대 용기량(δ_{max})의 관계는 하중재하 초기에는 큰 차이를 나타내지 않지만, 재하하중이 커짐에 따라 점차 그 차이가 크게 발생하여 2배 이상의 차이를 나타내었다.

감사의 글

이 연구는 포스코건설 연구과제 MG-000-DC500 학술 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 경량골재콘크리트 용벽의 설계와 시공, 1999.
2. 건설교통부, 콘크리트표준시방서, 2003.
3. 대한주택공사 주택연구소, 플라이애쉬 콘크리트의 특성 및 적용성에 관한 연구, 1999.
4. 김성철, 박기찬, 최형욱, “인공경량골재의 입도에 따른 고강도 경량콘크리트의 강도변화에 대한 실험적 연구”, 구조물진단학회지, 제15권 제5호, 2011. 9, pp.209-217.
5. 동아건설기술연구소, “경량기포 콘크리트 재료개발연구”, 건설교통부, 1996. 12.
6. 미래이엔씨, Bottom Ash를 활용한 Chemical Compaction Pile 제조 및 시공기술 개발, 산업자원부, 2005. 7.
7. 신흥철, 강희관, 최세진, 김규용, 김진만, 김무한, “플라이애쉬의 미연탄소 함유량에 따른 고유동 콘크리트의 품질에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회, 1997, pp.381-384.
8. 오재현, 오성원, “우리나라 석탄회의 이용현황”, 자원리싸이클링, 제8권 제1호, 1999, pp.60-65.
9. 천병식, 오민열, 임해식, 최현석, “석탄회의 토공재로서 활용에 관한 연구”, 한국지반공학회지, 제12권 제1호, 1996, pp.73-85.
10. 한국도로공사, EPS 성토공법연구, 1994년도 연구보고서.
11. 한국전력공사, 석탄회(Fly Ash) 및 탈황석고 활용 국제 워크숍, 1997.
12. 한국지반공학회, 연약지반, 지반공학시리즈 6, 1995.
13. 韓國土地開發公社, 軟弱地盤處理工法研究, 1987, pp.53-62.
14. 島津 晃臣, “輕量盛土工法の進展”, 土と基礎, vol. 37, No. 12, 1989, p.7.
15. 建設省土木研究所, (財)土木研究センター, ハイグレードソイル研究会, 發泡ビーズ混合輕量土の利用マニュアル(案), 1993.10.
16. 久野 悟地郎, 盤改良マニュアル, セメント協會, 1995, pp.191-215.
17. 稲田 倍穂, 軟弱地盤における土質工學, 1996, pp.324-341.
18. 久樂 勝行, 輕量盛土工法の特徴とその適用, 基礎工, vol. 18, No. 12, 1990, p.2.
19. A. K. Howard, “Soil-Cement Slurry Pipe Embedment”, SP 150-6, American Concrete Institute, Detroit, 1994, pp.97-110.
20. C. A. Langton, N. Rajendran, and S. E. Smith, “Use of Pond Ash in CLSM”, Concrete International, December, 1998, pp.58-62.
21. I. M. Alobaidi and J. Billam, “Use of Pulverized Fuel Ash in Trench Backfill”, Journal of Material in Civil Engineering, August, 2000, pp.228-237.

(접수일자 : 2011년 7월 21일)

(수정일자 : 2011년 10월 4일)

(심사완료일자 : 2011년 10월 7일)

요 지

본 연구는 최근 지반공학 기술의 발전에 따라 성토체체의 자중을 가볍게 하기 위한 방안의 일환으로 화력발전소에서 발생하는 다공성의 바텀애시를 골재로 활용한 모르타르 슬러리 내부에 기포를 혼합한 경량성토공법의 활용성을 평가하고자 하였다. 개발한 경량성토층을 연약지반의 상부에 적용하였을 때 지반거동을 관측하기 위하여 모형시험기를 제작하였으며, 단계적으로 하중을 증가시켜 지반의 거동과 변형값을 측정하였다. 또한, 연약지반 현장에서 실용화되고 있는 표층고화공법과 침하량, 지반응기량, 한계 하중값을 비교함으로써 개발한 기술의 효과를 비교, 검토하였다. 모형시험을 통한 관측결과, 타 연약지반처리공법과 달리 본 성토는 강도가 높아 지반변형 크기는 작은 반면 지반변형의 영역은 넓은 것으로 나타났으며, 하중-침하량과 응기량이 기존 표층고화공법에 비해 작게 나타나고 있어 연약지반 활용에 효과적인 것으로 평가되었다.

핵심 용어 : 연약지반, 경량성토공법, 바텀애시, 기포, 모형시험기, 침하량, 응기량