

폐기물을 활용한 유동성 복토재의 특성 평가

Estimation of Property for Flowable Fills Using Disposal Materials

이종규* · 이봉직** · 신방웅***

Lee, Jong-Kyu · Lee, Bong-Jik · Shin, Bang-Woong

Abstract

Flowable fills are self-leveling, liquid-like materials, and self-compacting to 95-100% of the maximum unit weight. Benefits of flowable fills include limited required labor, accelerated construction, ready placement at inaccessible locations, and the ability to be manually re-excavated. Applications for flowable fills include utility trenches, building excavations, underground storage tanks, abandoned sewers and utility lines, and filling underground mine shafts

The objective of this study is to estimate engineering property of flowable fills made of soil mixed with recycled stylofoam and stabilizer for using geotechnical field. For this study, the uniaxial compression test, flowable test, and model tests were performed. Based on the results of the tests, the following conclusions are : fills made of soil mixed with recycled stylofoam and stabilizer can be used as flowable fills, minimum stabilizer quantity for using flowable fills ranges from 1.0(kN/m³) to 1.2 (kN/m³).

Keywords : Light weighted soil, Recycled stylofoam, Flowable fill

요 지

유동성 재료는 자기수평능력을 갖고 있으며, 액체와 같은 물질로 최대단위중량의 95~100 %의 자기 다짐율을 발휘할수 있다. 유동성 재료는 노동력이 적게 들고, 시공속도를 높일수 있으며, 접근이 어려운 장소에도 적용이 가능하면서도 재굴착이 용이한 장점이 있다. 따라서 각종 트렌치, 굴착작업, 지중구조물, 오수 및 유틸리티 관과 지중의 공동충전 등에 이용된다. 본 연구의 목적은 고탍수비의 점성토와 페스티로폼 입자, 안정재 등으로 구성된 유동성 재료의 공학적 특성을 평가하는 것이다. 이를 위하여 일축압축실험, 유동성 시험 및 모형충전성 실험을 실시하였으며 폐기물을 활용한 혼합토는 안정재의 양을 1.0(kN/m³) ~ 1.2 (kN/m³) 이상을 사용하면 유동성재료로서 사용가능한 것으로 나타났다.

주요어 : 경량성토재, 페스티로폼, 유동성복토재

* 정회원 · 진산이엔지 지반실장(E-mail : jklee@empal.com)

** 정회원 · 충주대학교 건설도시공학과 부교수

*** 정회원 · 충북대학교 총장

1. 서론

최근 지중구조물이나 지하공동구, 기존 구조물과 인접한 굴착작업 등 좁은 공간에서의 되메움 공사가 증가하고 있다. 지중구조물의 축조는 대부분 지반을 굴착하고 구조물이 완성된 후 구조물과 굴착면 사이를 되메움하는 개착식 공법이 적용되고 있다.

이러한 경우 일반적인 복토재를 사용하면 좁은 공간에 적합한 다짐장비가 적으며, 큰 중량의 다짐장비를 사용할 경우 과다다짐으로 인한 구조물의 손상을 가져올 수 있어 최근 들어 다짐작업이 필요치 않은 유동성 복토재의 필요성이 증가되고 있다(Vipulanandan, 1998). 더욱이 유동성 복토재로서 성토재료로 부적당하게 여겨졌던 점토와 버려지는 스티로폼을 활용한다면 성토재료로서의 활용 및 폐기물의 재활용을 꾀할수 있을 것으로 기대된다.

페스티로폼 입자가 갖는 경량성과 안정재를 이용한 유동성과 강도특성을 이용한다면 경화되기 전에는 높은 유동성을 지니고 있어 좁은 공간이라도 효율적인 충전이 가능하며, 경화 후에는 침하 방지효과가 있으며 일반 양질의 토사에 비해 높은 강도와 페스티로폼의 경량성으로 인한 토압 감소 효과를 얻을 수 있기 때문에 다짐이 곤란한 장소에서 되메우기 등에 활용될 수 있다.

이에 본 연구에서는 복토재로 부적절한 고풍수비의 점성토와 페스티로폼을 활용하여 유동성 복토재로서의 사용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 유동성 복토재

유동성 복토재는 경화되기 전에는 높은 유동성을 지니고 있어 다짐이 곤란한 장소에서 되메우기나 충전 등에 유용하기 때문에 성토 및 복토 작업이 간편하고 타설 후에는 보통 토사에 비하여 높은 강도를 유지 할 수 있어 원형매설관 주변과 옹벽 뒷채움재로서 그 사용이 크게 증가하고 있다(Javed, 1994).

또한, 고성토부의 교대나 터널복공의 공동부와 같이 부등침하의 가능성이 크고, 큰 토압이 작용하는 장소에는 구조물을 효율적으로 계획할 수 있는 특징이 있다(Mast, 1998).

유동성 복토재는 복토공간과 지중구조물 사이의 공간을 완전히 채울 수 있는 유동성을 확보하여야 하며 경화 후에 일축압축강도가 일정한 범위 안에 있어야 한다.

즉, 복토작업 후에 재굴착이 필요한 경우 재령 28일 압축

강도가 690.39kPa를 초과해서는 안 되는 것으로 규정하고 있으며, Horiuchi의 연구에서는 200.04kPa 이상의 일축 압축강도를 제시하고 있다. 이처럼 유동성 복토재를 콘크리트와 같이 큰 강성체로 계획하지 않는 것은 벽체 뒤채움 및 복토재로 사용되기 때문에 큰 강도를 필요로 하지 않고 유동성을 확보하기 위해서는 낮은 강도를 유지하여야 하며 재굴착을 용이하게 수행하기 위해서이다(Howard, 1997).

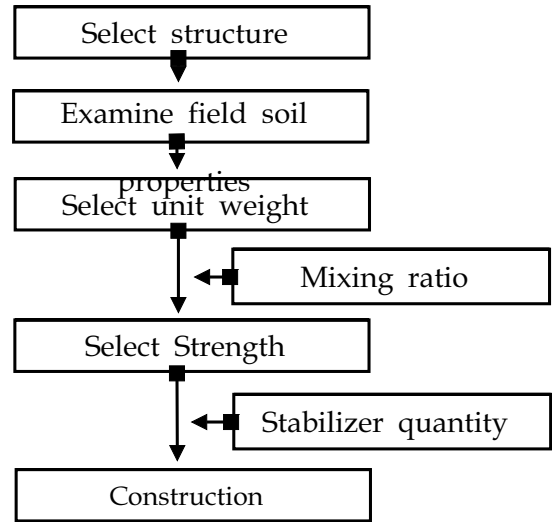


그림 1. 유동성 복토재의 설계 흐름도

유동성 복토재의 혼합설계는 혼합물의 성분, 설계강도 및 유동성 등에 의해서 좌우되며, 원지반 토사의 물리적 특성(입도분포, 입자 거칠기, 함수비, 비중), 안정재의 양 및 첨가재의 특성이 큰 영향을 미친다.

유동성 복토재의 설계순서는 그림 1과 같으며 유동성 복토재의 설계를 위해서는 페스티로폼 입자 혼합율과 단위중량, 안정재 양에 따른 강도특성간의 관계가 규명되어야 한다.

3. 재료의 물리적 특성

실험에 사용된 점성토는 서해안 지역에서 교란된 상태로 시료를 채취하여 실내에서 불순물을 제거한 후 재성형하였다. 실험결과 대상시료는 0.074mm체 통과율이 91%이며 통일분류법에 의거 CL~ML로 분류되었으며, 연경도 실험결과 소성지수가 15~20%로 비교적 저소성·저압축성을 나타내고 있으며 자연함수비는 35~38%로 대표적인 서해안 점성토의 특성을 나타냈다.

대상시료에 대한 물성실험 결과는 표 1과 같다.

표 1. 사용토사의 물리적 특성

Physical properties	Quantity
USCS	CL~ML
Percent passing through the No.200 sieve (%)	91
LL (%)	30.6~33.8
PL (%)	22.5~27.3
PI (%)	8.1~6.5
ω (%)	35~38
G_s	2.65
γ_t (kN/m ³)	16.87

실험에 사용된 페스티로폼은 폐기되어 분리수거된 스티로폼을 분쇄기를 통하여 구형 입자형태로 재생된 것을 사용하였다. 입경 범위는 0.8~5mm의 구상의 입자로 되어있으며, 단위중량은 0.16~0.275(kN/m³)의 범위에서 분포하는 것으로 나타났다.

본 연구에 사용된 안정재는 시멘트로서 가장 널리 사용되고 있는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

4. 실험장치 및 방법

실험은 점성토와 페스티로폼 입자를 활용하여 유동성 복토재로 사용 가능성을 평가하기 위하여 유동성 복토재로서 활용하기 위한 최소요구함수비를 구하였다. 또한 혼합율(RSB_c)에 따른 최소요구함수비 실험결과를 이용하여 모형 타설실험을 실시한 후 충전성과 온도특성을 평가하였으며, 유동성 복토재로서 사용하기 위한 강도 특성을 평가하였다.

실험을 위한 페스티로폼 혼합율은 시료의 단위중량이 9.8 (kN/m³) 전후로 형성될 수 있도록 40~60(%)로 변화하였으며, 안정재의 양(S_c)은 강도 특성을 고려하여 0.69~0.98 (kN/m³)의 범위에서 시료를 혼합하였다. 실험항목을 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 실험 방법

	Item	S_c (kN/m ³)	RSB_c (%)
Test series A	Minimum water content	0.69,0.98, 1.18,1.47	40,50, 55,60
Test series B	Strength	0.69,0.98, 1.18,1.47	40,50, 55,60
Test series C	Temperature	0.98	40,50, 60
Test series D	Charge properties	0.98	40,50, 60

4.1 최소 요구 함수비 시험

최소요구함수비를 구하기 위해서 Nantung(1993)이 제안한 시험방법을 이용하였다. 실린더에 시료를 평평하게 완전히 채운 후, 표면이 매끄러운 유리판에 부어, 퍼진 재료의 지름이 200~300mm를 만족하는 함수비를 결정하였다.(Nantung, 1993)

본 연구에서는 페스티로폼 혼합율을 40%, 50%, 55%, 60%로 변화시켜가며 콘크리트 믹서를 이용하여 혼합하였으며, 각 혼합율에 따라서 안정재양을 0.69, 0.98, 1.18, 1.47kN/m³로 각각 변화시켜가며 재료의 퍼진 지름이 300mm를 만족할 때까지 함수비를 점차적으로 변화시켜가며 실험을 실시하였다.

4.2 충전성 시험장치

유동성실험을 통하여 구한 최소 요구 함수비로 혼합한 시료를 이용하여 불규칙한 형상을 갖는 지중 공동에 모형충전 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 토조는 그림 2와 같다.

충전율은 타설 시에 측정된 유동성 복토재의 중량으로 부터 체적을 구하여 타설 전의 토조속 공극의 체적으로 나눈값으로 평가하였으며, 동시에 토조내의 온도변화를 측정하기 위하여 토조의 상, 중, 하단부에 온도측정장치를 매설하여 시간에 따른 온도변화를 측정하였다.

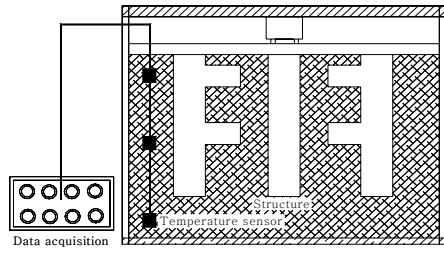


그림 2. 충전율 평가를 위한 모형실험 장치

4.3 일축압축강도 시험

유동성 복토재의 강도특성을 평가하기 위하여 일축압축강도 시험을 실시하였다. 시료는 최소요구함수비에 맞추어 제작하였으며 크기에 따른 강도의 영향을 배제하기 위하여 직경과 높이의 비율을 2~2.5로 유지하였다.

5. 분석 및 고찰

5.1 유동성 복토재의 최소 요구 함수비 특성

유동성 복토재로서 사용하기 위해서는 자기수평능력이 필수적으로 실험결과 그림 3과 같이 안정재의 양에 따른 최소 요구 함수비는 안정재의 양이 증가할수록 작아지는 것으로 나타났다. 반면에 그림 4와 같이 페스티로폼 입자의 혼합율에 따른 최소 요구 함수비는 페스티로폼 혼합율이 증가할수록 자기수평능력에 도달하는 함수비는 증가하는 것으로 나타났다.

표 3. 최소 요구 함수비 결과

R_{SB_c} \ S_c	40 (%)	50 (%)	55 (%)	60 (%)
0.69 (kN/m^3)	64.81	66.7	73.53	76.2
0.98 (kN/m^3)	61.97	63.81	71.43	75
1.18 (kN/m^3)	60.58	61.36	69.75	72.3
1.47 (kN/m^3)	59.39	61.22	69.36	71.3

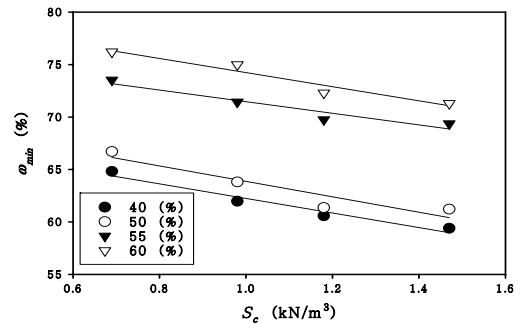


그림 3. 안정재 양에 따른 함수비 변화

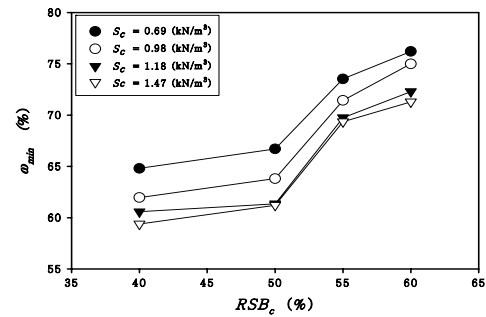


그림 4. 혼합률에 따른 최소 요구 함수비 변화

따라서, 유동성 확보를 위한 최소 요구 함수비는 안정재의 양과 페스티로폼 혼합율 모두에 영향을 받는 것으로 나타났다.

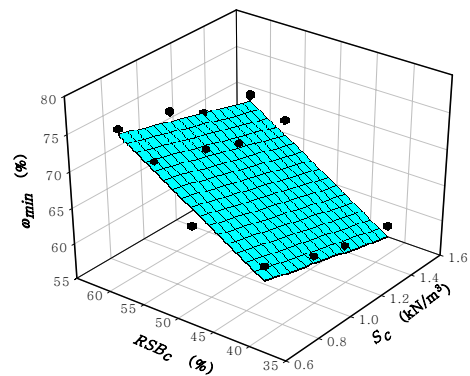


그림 5. 혼합율에 따른 최소 요구 함수비 회귀분석 결과

페스티로폼 혼합율과 안정재의 양에 따른 최소 요구 함수비를 나타내면 그림 5와 같은 평면으로 표현할 수 있으며, 이를 식으로 나타내면 식(1)과 같다. 이때의 결정계수는 0.87이다.

$$\omega_{\min} = 39.98 - 6.64S_c + 0.67RSB_c \quad (1)$$

여기서, ω_{\min} : 최소 요구 함수비(%)

S_c : 안정재 양(kN/m³)

RSB_c : 페스티로폼 혼합율(%)이다.

5.2 유동성 복토재의 강도 특성

페스티로폼 혼합율 및 안정재에 따른 강도 특성을 도시하면 그림 6과 같다.

실험결과 안정재의 양과 페스티로폼 혼합율에 따른 강도 특성은 안정재의 첨가량과 페스티로폼 입자의 함유율 모두에 의해서 영향을 받는 것으로 나타났으며, 특히 안정재 첨가량의 영향에 민감한 것으로 나타나 안정재의 양의 조절을 통하여 적정 강도 발현이 가능한 것으로 나타났다. 그림 7은 안정재 첨가량과 혼합율에 따른 다중회귀분석 결과를 나타내었다.

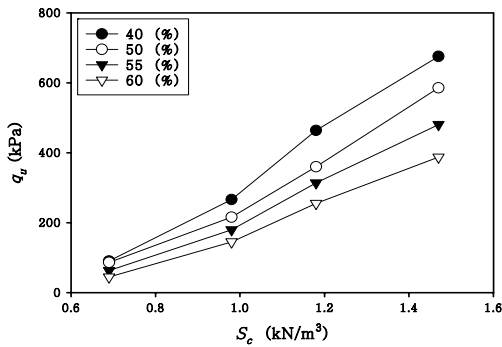


그림 6. 안정재 양에 따른 일축압축 강도

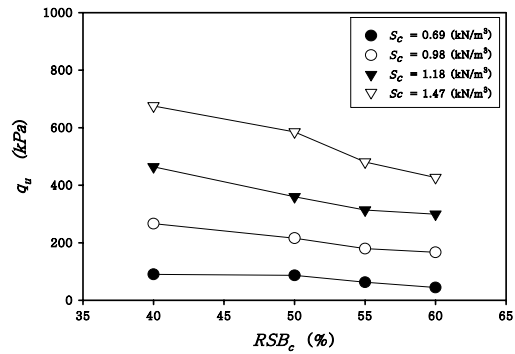


그림 7. 혼합율에 따른 일축압축강도

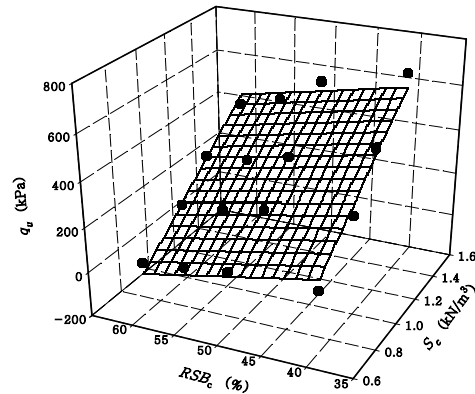


그림 8. 혼합율에 따른 일축압축강도 회귀분석 결과

실험결과를 이용하여 페스티로폼 혼합율과 안정재의 양에 따른 강도 특성을 도시하면 그림. 8과 같이 평면으로 나타낼 수 있으며, 다중회귀분석 결과 식(2)와 같으며, 결정계수는 0.963이다.

$$q_{u28} = 0.92 + 613.68S_c - 7.20RSB_c \quad (2)$$

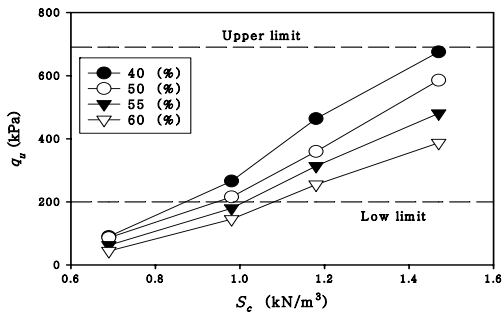


그림 9. 유동성 복토재의 관리기준과 강도 특성

유동성 복토재의 강도 기준으로서 본 연구에서는 최대 일축압축강도 690.39kPa, 최소일축압축강도 200.04kPa (Horiuchi)를 기준으로 강도특성을 분석하였다.

그림 9는 유동성 복토재의 관리기준과 혼합율에 따른 강도특성을 나타낸 것으로 페스티로폼과 고 함수비의 점성토를 이용하여 유동성 복토재로 활용하기 위해서는 안정재의 양을 0.98(kN/m³) 이상을 사용하고 페스티로폼 혼합율을 50%이하로 사용하여야 하는 것으로 나타났다.

단, 안정재를 1.18 ~1.47(kN/m³)의 범위에서 사용할 경우 페스티로폼 혼합율에 제한없이 유동성 복토재로 사용 가능한 것으로 나타났다.

5.3 유동성 복토재의 중량 특성

그림 10은 안정재의 양과 페스티로폼 혼합율에 따른 중량 특성을 도시한 것으로 안정재의 첨가량과 페스티로폼 입자의 함유율 모두에 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 안정재가 증가할수록 단위중량은 증가하며 페스티로폼 입자가 증가할수록 중량이 감소하는 경향을 보였다.

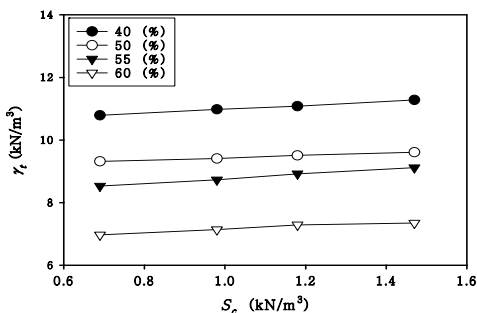


그림 10. 안정재 양에 따른 단위중량 특성

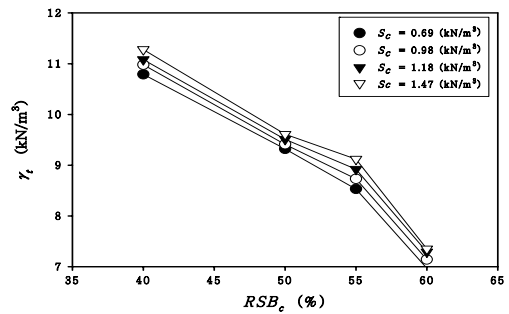


그림 11. 혼합율에 따른 단위 중량

실험을 통하여 얻어진 자료를 대상으로 혼합율에 따른 단위 중량 관계를 다중회귀분석을 실시하였으며 그 결과는 그림 12와 같다. 회귀분석 결과, 식(3)과 같이 분석되었으며 유의수준 0.01인 것으로 나타났다. 그림 11은 혼합율에 따른 중량특성을 도시한 것이다.

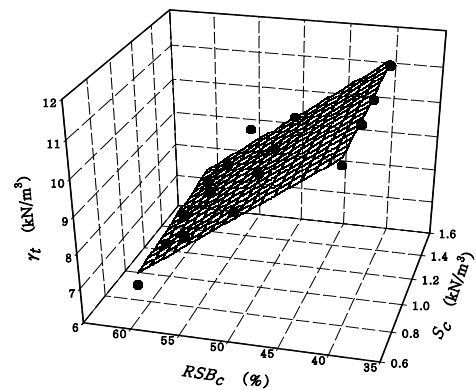


그림 12. 혼합율에 따른 단위중량 회귀분석 결과

따라서, 안정재의 양이 일정할 때 페스티로폼 혼합율이 1% 증가할 때 경량 성토재의 중량이 0.18씩 감소함을 의미한다. 이때의 결정계수는 0.97다.

$$\gamma_t = 17.88 + 0.57S_c - 0.18RSB_c \quad (3)$$

여기서, RSB_c : 페스티로폼 혼합율(%)
 S_c : 안정재의 양(kN/m³)
 γ_t : 단위중량(kN/m³)

5.4 충전 및 온도 특성

유동성 복토재의 적용성을 평가하기 위하여 지중의 공동을 모사한 실내모형실험을 실시하였으며, 충전율은 타설 시에 측정된 유동성 경량 성토재의 단위중량으로부터 체적을 구하고 이를 타설 전의 토조 속 공극의 체적과 비교하여 산정하였다.

실험은 페스티로폼 혼합율 40, 60%를 대상으로 하였으며 실험 후 페스티로폼 입자는 비교적 균등하게 분포하고 있었으며 다른 재료와의 분리현상 역시 발생하지 않았다. 페스티로폼 혼합율에 따른 충전율 평가 결과 모든 실험에서 충전율이 90% 이상인 것으로 나타나 간격이 좁고 복잡한 형태의 지중구조물이라도 비교적 공극을 효율적으로 되메움할 수 있는 것으로 나타났다. 실험결과는 표 4와 같다.

표 4. 혼합율 평가 결과

RSB_c (%)	Item	Unit weight (kN/m^3)	Charge ratio (%)
40		11.92	98.69
60		9.66	97.29

그림 13~14는 유동성 복토재의 타설시 및 타설후의 온도변화를 측정하기 위하여 온도센서를 상, 중, 하부에 설치하고 시간에 따른 온도변화를 측정하였다.

실험결과 온도계측지점에 따라서 하부가 비교적 높은 발열을 하는 것으로 계측되었으며 상부가 가장 발열에 둔감한 것으로 나타났다. 또한, 페스티로폼 혼합율에 따라서 다르지만 유동성 복토재 내부의 온도는 상온에 비하여 6°C 이내로서 경화시 발생하는 발열로 인한 온도의 변화의 영향은 미미하였다.

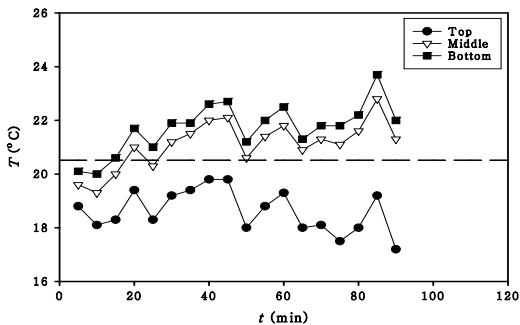


그림 13. 시간에 따른 온도 변화(혼합율 40%의 경우)

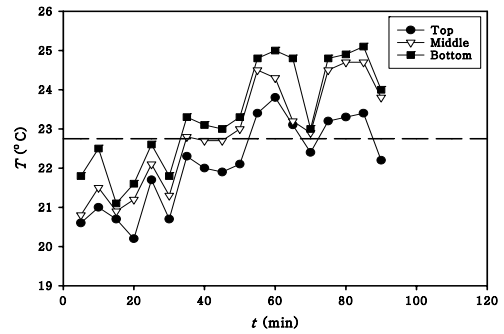


그림 14. 시간에 따른 온도 변화(혼합율 60%의 경우)

6. 결론

고함수비의 점성토와 페스티로폼을 활용하여 유동성 복토재로서의 사용가능성을 평가하기 위하여 실내실험을 실시하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 최소 요구 함수비는 안정재의 양이 증가할수록 감소하며 페스티로폼 혼합율이 증가할수록 자기수평능력에 도달하는 함수비는 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 고 함수비의 점성토와 페스티로폼을 이용하여 불규칙한 공간의 충전을 실시한 결과 충전율이 90%이상으로 나타나 유동성 복토재로서의 충전 특성이 우수한 것으로 판명되었다.
- (3) 안정재의 양과 페스티로폼 혼합율에 따른 강도 및 증량 특성은 안정재의 첨가량과 페스티로폼 입자의 함유율 모두에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 특히 안정재 양의 영향에 민감한 것으로 나타나 안정재 양의 조절을 통하여 적절한 강도 구현이 가능함을 알 수 있었다.
- (4) 유동성 복토재로서 적정의 강도를 갖기 위해서는 페스티로폼 혼합율은 50%이하를 사용하여야 하며, 안정재를 $1.18 \sim 1.47(\text{kN/m}^3)$ 의 범위에서 사용할 경우 페스티로폼 혼합율에 제한없이 유동성 복토재로 사용 가능한 것으로 나타났다.
- (5) 페스티로폼 혼합율에 따라서 다르지만 온도변화는 상온에 비하여 6°C 이내로서 경화시 발생하는 발열로 인한 온도의 변화의 영향은 미미한 것으로 나타나 지중구조물에 미치는 온도의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

(접수일자 : 2005년 2월 14일)

참 고 문 헌

1. Howard, A. K.(1997), Flowable fill solves pipe backfilling problems, Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 1609~1612.
2. Javed, S(1994), Use of Waste Foundry Sand in Highway Construction, Purdue University, pp. 273.
3. Mast, David. G. and Fox, Patrick. J(1998), Geotechnical Performance of a Highway Embankment Constructed Using Waste Foundry Sand, Proceedings of Session of Geo-Congress 98, pp. 66~85.
4. Nantung, T. (1993), Design Criteria for Controlled Low Strength Materials. HERPICC Report No. H-97-2, School of Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN., pp. 20~55
5. Vipulanandan. C., Weng, Y. and Zhang, C(1998), Role of Constituents on the Behavior of Flowable Fly Ash Fill, Proceedings of Session of Geo-Congress 98, pp. 137~140.