

폐주물사를 이용한 유동성 채움재의 절토구간 옹벽 뒤채움시 사일로토압 및 토압경감효과 연구

A Study on Effect of Earth Pressure Reduction and the Silo Earth Pressure of the Retaining Wall by CLSM Backfill with Waste Foundry Sand

조재윤* · 이관호** · 조윤호***

Cho, Jae-yun* · Lee, Kwan-ho** · Cho, Yoon-ho***

ABSTRACT

The recycling of waste foundry sand(WFS) and fly ash as by-products of industry is one of the urgent problem to deal with. For the recycling of these materials, CLSM(controlled low strength materials) concept was adopted. This research has been done for last three years. In this research, couple of selected waste foundry sand and fly ash were used as fine aggregate. Also, WFS modified by proper chemical liquid was used for the comparison. The main focus is to evaluate the silo earth pressure and the reduction effect due to the use of CLSM instead of normal fine aggregate. Silo effect, which occurs at short distance between retaining wall and backfill, was not detected because the characterization of CLSM is highly different from that of normal aggregate. Therefore, the theory for earth pressure, like Rankine theory or Coulomb theory, should be carefully used for CLSM. The reduction of earth pressure for modified WFS is higher than the others. But, the final earth pressure is converged at very small value, even though the reduction effect depends on the curing time.

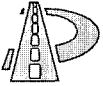
Keywords : CLSM, fly-ash, flowable backfill, lateral earth pressure, waste foundry sand

요 지

대표적인 산업부산물인 폐주물사와 플라이애쉬의 재활용은 매우 시급한 현안중의 하나이다. 이러한 산업부산물의 재활용을 위해 저장도콘크리트 개념을 적용한 유동성채움재(CLSM)로의 재활용을 위한 기본 연구가 지난 3년간 수행되었다. 본 연구에서는 폐주물사중 환경오염문제의 발생 가능성이 적은 것을 선별하여, CLSM용 잔골재로 이용하였다. 특히, 폐주물사에 화학약품처리를 하여 재활용 잔골재로 이용하는 방식사 역시 실험 재료로 이용하였다. 실험은 기존에 보편적으로 이용되는 뒤채움재 시공시 발생하는 사일로토압에 대한 검증과 토압경감효과에 대한 연구를 수행하였다. 실험결과 CLSM은 기존의 뒤채움재와는 그 성질이 매우 달라서, 옹벽배면과 절개면사이의 거리가 짧아서 발생하는 사일로 토압효과는 나타나지 않았다. 이는 기존의 뒤채움재와는 상당히 다른 재료이고, 또한, 기존에 이용되는 각종 토압론의 공식적용에 다소 신중해야 할 것으로 판단된다. 사용된 잔골재용 시료중에서는 방식사가 가장 큰 토압경감 효과를 나타냈고, 사용된 CLSM의 잔골재 특성에 따라 토압경감 효과에 다소 시간적인 차이는 있으나, 그 절대값은 어느 정도 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 폐주물사, 플라이애쉬, 유동성채움재, 사일로토압

* 정회원 · 동의공업대 토목과 교수 (cjy@dit.ac.kr / Tel. : 051-860-3116)
** 정회원 · 경성대학교 건설환경공학부 조교수 (khlee@ks.ac.kr / Tel. : 051-620-4756)
*** 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 조교수 (yhcho@cau.ac.kr / Tel. : 02-820-5336)



1. 서론

우리나라의 2차산업의 발전은 경제적 풍요를 가져다 준 반면에, 많은 환경문제를 발생시키고 있다. 이의 대표적인 사례로는 유연탄 또는 무연탄을 이용하여 전기를 생산하는 화력발전소에서 발생하는 플라이애쉬와 자동차 부품등을 생산하는 주물공장에서 발생하는 폐주물사등이 있다. 특히, 폐주물사의 경우 사용된 집결체의 일부 유해한 화학성분 및 색깔로 인해 이의 재활용이 매우 제약을 받고 있는 실정이다. 그러나, 세계 자동차 생산국 5위인 우리나라의 위상을 고려하며, 각종 주물생산량은 매년 증가할 것이다. 따라서, 이의 적절한 또는 대량의 재활용 방안을 적극적으로 찾아야 할 것이다.

이에 본 연구진은 지난 3년간 폐주물사 및 플라이애쉬의 대량재활용을 위해 토목 및 건설용재료로의 활용방안에 대한 심도 있는 연구를 수행하였다. 특히, 연구의 내용은 기존의 재료를 단순히 치환하여 사용하는 방안보다는, 특정한 목적 또는 기능에 맞추어 재료를 사용할 수 있는 연구에 그 주안점을 두었다. 연구의 첫 번째 재활용처로는 각종 구조물의 시공마무리에 이용되는 뒤채움재(backfill materials)이다. 기존의 뒤채움재는 주로 모래 또는 토사를 이용하며, 일정한 강도 및 침하에 대한 안정성을 증가시키기 위해 로올러와 같은 다짐장비를 이용하여 다짐으로 마무리를 하였다. 그러나, 재료적인 문제, 다짐장비의 주행성 및 효율등으로 인해 뒤채움재의 부실한 시공사례 및 이로인한 각종 구조물의 파손, 즉 지하매설관의 파손, 도로의 함몰 등의 주요한 원인이 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구진은 저강도 콘크리트의 일종인 CLSM (Controlled Low Strength Materials)을 지반 및 도로공학에 적용하였다. CLSM은 유동성 뒤채움재(flowable fill), 강도조절 채움재(controlled strength fill), 유동성

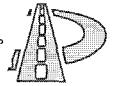
모르타르(flowable mortar), 흙-시멘트 슬러리(soil-cement slurry) 등으로 불리고, 이의 대표적인 특성은 자기수평능력(self-leveling), 자기다짐(self-compacting), 유동성(flowability), 인위적인 강도조절, 시공후 재굴착이 용이하다는 것이다 (Abichou et al., 1998, Naik & Singh, 1997). 이러한 다양한 특성을 가진 CLSM은 기존의 뒤채움재 사용시 발생하는 부적절한 다짐(과다짐 또는 빈다짐)으로 인해 발생하는 문제를 해결할 수 있다. 지난 3년간의 응력적용성 연구에서 뒤채움재 타설후 응력에 작용하는 토압이 상당히 경감하는 것을 확인하였고, 응력의 전도, 활동등에 대한 안전성을 고려한 최적의 시공방법, 즉 뒤채움 1회 타설높이 및 타설시간간격을 제안하였다 (Lee et al., 2001; 조 등, 2000).

본 연구의 주된 목적은 기존의 응력뒤채움재 연구의 연속선상에서 토사를 이용한 응벽에서 발생하는 사일로토압(Silo Earth Pressure)의 검증과, 기존에 보편적으로 이용되는 모래 대신 산업 부산물 (폐주물사 및 플라이애쉬)을 이용한 CLSM을 이용한 응벽뒤채움 타설후 수평토압변화를 모형응벽시험을 통해 검증하는 것이다.

2. 폐주물사 및 플라이애쉬의 재활용 현황

2.1 폐주물사

국내의 연간 주물생산량은 20년 전에 비하여 무려 14배정도 주물생산량이 증가하고 있으며 선진국으로 진입하여 주물수요가 정체기를 보일 때까지는 연평균 5%정도씩 계속 증가할 것으로 예상된다. 주물생산량 증대에 따른 주물사 구입량 및 폐주물사도 이에 비례해서 증가할 것으로 예상된다. 폐주물사 발생에 따른 매립지 고갈 등으로 재생사의 사용비율이 점차 높아지면 그 비용문제로 어려움에 처할 전망이다.



폐주물사의 재활용으로써 가장 먼저 들 수 있는 것은 폐주물사를 처리하여 다시 재생주물사로서 이용하는 것이나, 이러한 재처리는 비용이 많이 들 수 있다. 이러한 처리방법 외에 이용할 수 있는 재활용 방법은 주로 건설재료로의 이용이다. 시멘트풀이나 콘크리트의 잔골재로 재사용시 입경이 적어 다른 골재와 혼합하여 사용해야 하는 불편한 점이 있다. 아스팔트골재나 시멘트제품(벽돌, 기와, 블록, 흙관)으로의 사용시 입경이 적어 다른 골재와 혼합하여 사용해야 한다. 또한 도로의 하층 노반재로 사용하기 위해서는 다른 골재와 섞어 입도조정을 하여 사용할 수 있으며, 시멘트의 원료로도 이용이 가능하다(조, 2000).

2.2 플라이애쉬

석탄회는 석탄을 보일러에서 연소시킴으로써 발생되는 회를 의미하여, 대부분의 석탄회는 무연탄이나 역청탄, 아역청탄, 갈탄, 아탄 등의 유연탄을 미분탄기 내에서 건조, 분쇄시킨 후 이 미분탄을 보일러에서 연소시켜 발생되는데, 이때 채취되는 석탄회는 전체 미분탄의 15~45% 정도가 보일러 저부에서 채취되는 저회(Bottom Ash)이고, 나머지는 플라이애쉬(Fly Ash)이다. 석탄회의 많은 양은 처리장에 매립 처분되고 있다. 현재 이용되는 매립 시스템으로는 건조한 석탄회를 그대로 매립하는 건식매립 시스템과 석탄회를 미리 물과 혼합시켜 슬러리 상태로 매립하는 습식매립 시스템이 있고, 매립위치별로는 처리장의 입지조건에 따라서 해안매립과 내륙매립으로 대별할 수 있다.

미국에서 석탄회의 대량 이용분야는 주로 도로, 제방, 매립, 채움, 기반안정재 등의 토목분야가 이에 해당되며, 반면 국내의 경우에는 석탄회 이용율도 매우 낮고, 활용 용도도 한정되어 있다. 재활용율은 무연탄계가 비교적 높게 나타나며, 국내 플라이애쉬 재활용율은 18.3%로 국외에 비하면 아주 미흡하다. 재활용율이 저조한 이유는 매립에 의한 처리가 주로 이루어지고 있기 때문이다. 특히, 국내산 무연탄을 사용하는 발전소의 플

라이애쉬가 KS규격상의 품질조건을 만족시키지 못하여 기와, 벽돌제조, 시멘트 혼화제등 특정분야에만 일부 활용되어 왔기 때문이다. 그러나, 최근에 환경보존차원과 자원의 부족, 그리고 매립지 확보한계 등 환경적, 경제적 변화로 인하여 재활용 가능성이 증대되고 있다(조 등, 2000 ; 한국전력공사, 1992).

3. Silo토압이론

본 연구에서는 일반 현장의 지형에 따른 옹벽의 뒤채움폭이 좁아지는 경우에 CLSM뒤채움시 사일로토압을 적용하고자 한다. 그림 1은 사일로, 암거 등과 같이 연직하는 두 벽면 사이에 흙을 뒤채움할 때, 흙 자중의 일부가 벽면마찰에 의해 지지되는 경우를 보여주고 있다.

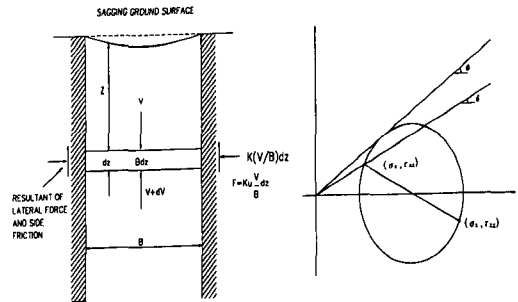


그림 1. 아칭효과에 의한 사일로 토압 구성요소

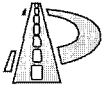
이 요소에 작용하는 힘들의 연직평형방정식을 취하면 식(1)과 같다.

$$V + dV + 2K\mu \frac{V}{B} dz = V + rBdz \quad (1)$$

여기서, 벽면마찰계수 $\mu = \tan \delta$ 이다.

식(1)은 선형미분방정식이며, 그 해는 식(2)와 같이 표현된다.

$$V = rB^2 \frac{1 - \exp\{-2K\mu(z/B)\}}{2K\mu} \quad (2)$$



따라서 수평토압 σ_h 는 식(3)과 같다.

$$\sigma_h = K \frac{V}{B} = r \frac{B}{2\mu} [1 - \exp\{-2K\mu(h/B)\}] \quad (3)$$

여기서 토압계수 K는 Marston과 Anderson (1913) 등에 의해 Rankine의 주동토압계수를 사용하였지만, 이후 Krynine(1945)은 벽면의 마찰력이 완전 동원된 경우에 대하여 아래와 같이 정의하였다.

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{1 - \sin^2\phi}{1 + \sin^2\phi} \quad (4)$$

한편, Handy(1985)는 최소 주응력 아치로부터 K를 제안하였다. 벽면마찰이 완전 동원된 경우에는 식(5)와 같다.

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = 1.06 (\cos^2\theta + K_a \sin^2\theta) \quad (5)$$

Frydman과 Keissar(1987)는 평면 아치로 간주하여 벽면마찰이 부분 동원된 경우의 K를 식(6)과 같이 제안하였다.

$$K = \frac{(\sin^2\phi + 1)}{(4 \tan^2\delta - \sin^2\theta + 1)} \quad (6)$$

$$\frac{\sqrt{(\sin^2\phi + 1)^2 - (1 - \sin^2\phi)(4 \tan^2\delta - \sin^2\theta + 1)}}{(4 \tan^2\delta - \sin^2\theta + 1)}$$

본 연구에서는 CLSM의 양생에 따른 복잡한 토압의 거동해석을 피하고, 또한 강도 증가에 따른 재료의 명확한 해석을 위해 모형옹벽의 벽면을 매끈하게 하였으며, Rankine의 주동토압계수를 사용하였다.

$$K_a = \frac{(1 - \sin\phi)}{(1 + \sin\phi)} \quad (7)$$

4. 실험재료의 기본물성 및 최적배합비

4.1 플라이애쉬 및 시멘트

본 연구에서 사용된 플라이애쉬는 원료로 유연탄 및 무연탄을 사용하고 있는 태안 화력발전소에서 발생한 것이다. 본 연구에서 사용된 플라이애쉬의 분류는 표 1의 Class F에 해당하며, 비중은 2.170이었다. 본 플라이애쉬는 시멘트에 혼합하기 위해 정제하기 바로 전 단계의 것으로 그 화학적 조성은 표 2와 같다. 또한 본 연구에서 사용된 시멘트는 KSL 5201에서 규정한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

표 1. ASTM의 플라이애쉬 분류표 (ASTM, 1994)

구성요소	분류		
	N	F	C
min SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	70.0	70.0	50.0
max SO ₃ (%)	4.0	5.0	5.0
max Moisture content (%)	3.0	3.0	3.0
max Loss on ignition (%)	10.0	6.0	6.0
max Na ₂ O (%)	1.5	1.5	1.5

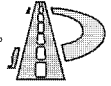
※ L.O.I. : Loss On Ignition

표 2. 플라이애쉬의 화학적 구성요소

구성요소	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	
구성비 (%)	60.33	24.78	3.82	1.06	0.00	
구성요소	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	L.O.I
구성비 (%)	2.39	0.84	0.86	0.59	0.50	4.84

4.2 폐주물사 및 일반모래

본 연구에서 사용된 폐주물사는 후란수지를 이용한 후란사(Furane Sand)이고, 다른 주물사에 비해 굵은 입도를 가져 정밀도를 필요로 하지 않는 주형을 제조하는 데 사용된다. 또한, 기존의 폐주물사를 마그네슘염을 처리하여 재활용하고 있는 방식사를 이용하였다. 방식사는 주로 주철관



지하매설물 뒤채움재로 이용되고 있고, 특히 주철관의 부식방지에 상당한 효과가 있는 것으로 실험결과 보고되고 있다(이무강, 1998). 폐주물사의 XRF(X-ray Refraction) 실험 결과인 표 3에 의하면, 원재료가 모래인 만큼 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 90% 이상 차지함을 볼 수 있으며, 특히 방식사의 경우 화학약품등으로 재처리되어 있으므로, 시험준비중에 손실되는 양이 많음을 알 수 있다. 모래와 각 폐주물사 종류에 따른 입도분포는 그림 2, 입도분석은 표 4에 나타내었다. 비중시험결과 각 폐주물사의 비중은 후란사(Furane Sand)는 2.459 그리고 방식사는 2.684이며, 바다모래의 비중은 2.652이었다. 본 연구에 사용된 모래는 시중에서 구할 수 있는 바다모래를 씻어서 사용했으며, 입자의 형태는 약간 뾰족한 모양이다.

표 3. XRF 시험을 통한 폐주물사의 구성성분 (단위 : %)

Sand	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MnO
Green	80.74	7.92	2.75	0.22	0.00
Furane	87.04	5.45	0.91	0.19	0.00

Sand	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	L.O.I.
Green	0.71	0.48	2.27	1.43	0.02	3.46
Furane	0.19	0.04	2.67	0.66	0.01	2.85

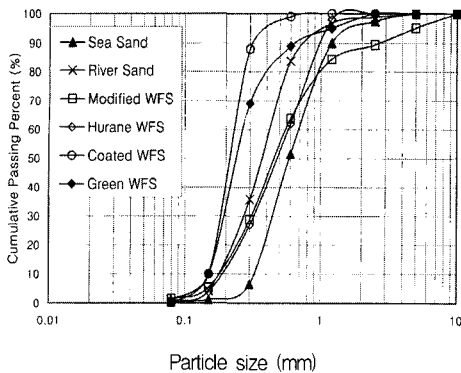


그림 2. 시료의 입도곡선

표 4. 시료의 체분석 결과

구분	폐주물사			일반모래	
	생형사	후란사	방식사	바다모래	강모래
D ₁₀ (mm)	0.14	0.20	0.36	0.37	0.18
D ₃₀ (mm)	0.21	0.34	0.61	0.46	0.27
D ₆₀ (mm)	0.25	0.57	1.15	0.68	0.42
Cu	1.79	2.85	3.19	1.84	2.33
Cc	1.26	1.01	0.90	0.84	0.96
입도	Poorly	Gap	Poorly	Poorly	Poorly

4.3 CLSM의 최적배합비

미국의 콘크리트 협회(The American Concrete Institute, 1994)의 시방서에는 CLSM을 자체 점착성을 가지는 재료로서 초기에는 흐름특성이 중요한 요소이고, 시간에 따라 양생되면서 강도가 증가하여, 28일 양생후의 압축강도가 8.3 MPa 보다 작은 재료로서 정의 하였다. CLSM채움재로 시공 후 재 굴착하기 위해서 재령 28일 재료의 일축압축강도를 약 1035 kPa로 제한하고 있으며, 본 연구에서는 시료의 목표강도를 550kPa로 결정 하였다(Bhat & Lovell, 1996 ; Horiuchi et al., 1992 ; Janardhanam et al., 1992 ; Smith, 1991). 본 연구에서는 흐름특성을 규명하기 위해 실험의 용이성과 유동성 채움재의 특성을 고려해 제안된 Nantung(1993)의 방법을 이용하였으며, 기존의 발표된 혼합재료의 특성 연구(조, 2000)에 그 내용이 자세히 기술되어있다. 표 5는 최적배합설계 시 각 혼합재료에 대한 잔골재(폐주물사, 방식사, 및 일반모래), 플라이애쉬, 물, 시멘트의 구성비를 나타낸다.

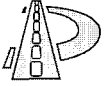


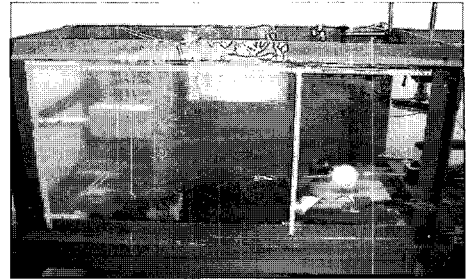
표 5. 사용된 최적배합비 (%)

구분	생형사	후란사	방식사	강모래	바다모래
플라이애쉬	8.1	17.1	29.8	20.8	21.6
잔골재	64.7	61.9	47.2	55.5	58.4
시멘트	3.0	1.6	1.54	3.6	1.8
물	24.2	19.4	21.6	20.1	18.2

5. 모형옹벽실험장치

5.1 모형 실험장비

모형 실험에 사용된 모형 토조는 그림 3과 같으며, 토조의 크기는 100cm×52cm×50cm(가로×세로×높이)이고, 시험결과는 data log를 통해 자동계측된다. 토조의 측면도 및 평면도는 그림 4와 같다. 측벽의 한쪽은 아크릴판(t=50mm)으로 되어 있으며, 실험시 폐주물사와 벽체의 거동, 그리고 각 계측장치를 관찰할 수 있게 하였다. 본 실험에 사용될 모형옹벽은 그림 5와 같으며, 옹벽의 크기는 50cm×52cm(높이×폭)이다. 재질은 강판(t=7mm)이며, 채널형 강으로 보강하였다. 수평 토압을 측정하기 위해 옹벽 전면에 로드셀을 세로 방향으로 설치하였다. 또한 모형 옹벽의 상하부 변위를 일으킬 수 있도록 저판과 옹벽을 연결하였다. 실험조건을 단순화하기 위해 벽면마찰의 영향을 최소화할 수 있도록 옹벽 표면에 페인트를 칠하여 매끈하게 하였다. 뒤채움 후 발생하는 옹벽의 상부 및 하부 변위를 측정하기 위하여 옹벽의 상, 하단에 각각 2개의 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 2개의 포텐 소미터를 설치하였다(조재운, 2000).



(a) 모형옹벽시험장치



(b) 자동계측시스템

그림 3. 모형옹벽시험토조 및 계측시스템

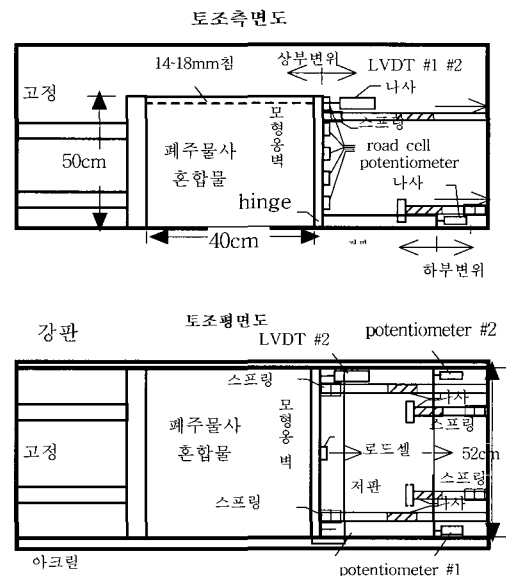
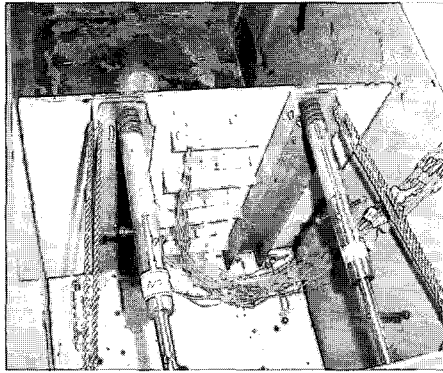
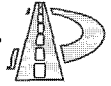
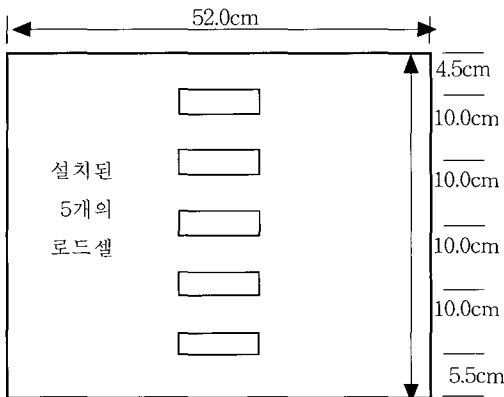


그림 4. 모형옹벽의 정면도 및 평면도



(a) 옹벽벽체에 설치된 로드셀



(b) 설치된 로드셀의 위치

그림 5. 옹벽에 설치된 로드셀 및 설치위치

5.2 실험방법

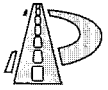
본 실험은 기존에 발표된 모형옹벽실험(조 등, 2000 ; Lee et al. 2001)과는 다소 다르게 적용되었다. 본 연구는 옹벽배면과 절개면 사이의 거리가 옹벽높이의 50% 이하인 경우의 뒤채움재 시공시 발생하는 토압에 대한 검증은 그 목적으로 한다. 특히 사일로 토압과의 상관관계를 규명하는 것이 주목적이므로, 뒤채움은 한번의 타설로 완료하였고, 벽체의 변위는 주동토압하에서 발생가능한 변위내에서 자유로이 움직일 수 있도록 조정

하였다. 일반모래의 뒤채움의 경우 모래비법(raining method)을 이용하여 소요의 밀도를 맞추었고, 유동성채움재의 경우 다짐이 필요하지 않고, 타설시 단지 펌핑만으로 시공을 종료할 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 그 양이 많지 않은 관계로 펌프를 이용한 펌핑대신 대형스폰을 이용하여 시료를 모형토조에 타설하였다. 뒤채움재 타설로 인한 옹벽의 안정성 검토는 기존의 발표자료에 자세히 나타나 있다(조 등, 2000 ; Lee et al. 2001). 다만, 옹벽벽체와 절개면이 옹벽 높이의 50%이하인 경우에 대한 토압비교평가를 위해 단계별 타설(기존의 논문 결과)대신 한번에 모형옹벽 뒤채움을 마무리하였고, 이때 발생하는 토압 및 양생시간에 따른 토압경감효과를 비교 및 평가하였다.

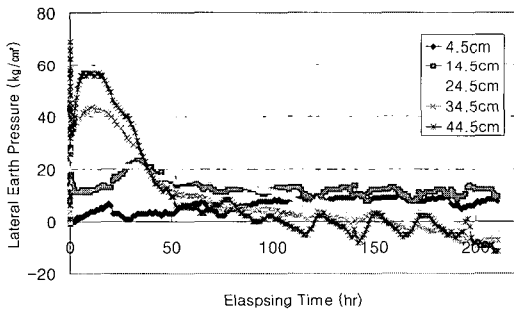
6. 모형옹벽 실험결과 및 해석

6.1 양생시간에 따른 수평토압

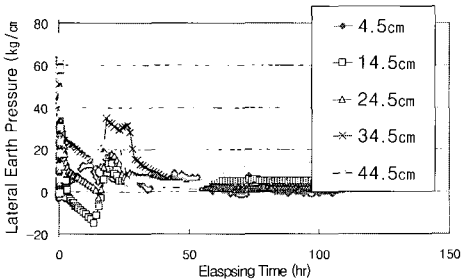
그림 6은 후란사, 방식사, 바다모래를 이용한 유동성채움재의 약 7일간의 양생시간에 따른 측정된 깊이별 수평토압을 보여준다. 본 연구에 이용된 유동성채움재는 초기에 많은 유동성을 가지는 슬러리 형태로서 모형옹벽에 타설시 타설 직후에 가장 큰 토압이 옹벽벽체에 작용하는데, 이는 그림 6에서 확인할 수 있다. 다만, 유동성채움재에 사용된 잔골재(후란사, 방식사, 바다모래)의 종류에 따라 최대 토압이 발생하는 시간에 다소 차이가 있을 뿐이다. 아래의 그림 7에서처럼 CLSM의 타설후 옹벽에 작용하는 수평토압은 타설직후 가장 크게 발생하고, 이후 CLSM에 이용된 물이 배수가 되는 과정에서 토압이 급격하게 줄어든다. 이는 CLSM 타설후 약 6시간 정도까지 나타나는 현상으로, 배수효과는 사용된 잔골재의 입도 및 재료의 특성에 따라 다소 차이가 있음을



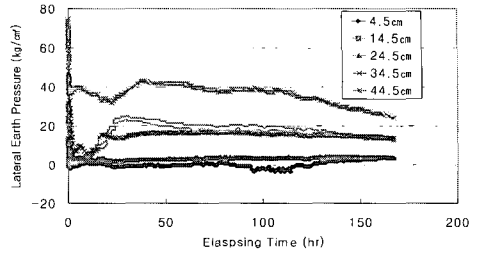
알 수 있다. 이후 시간에 따른 양생이 진행되면서 약간 특이한 현상이 나타나는데, 즉 타설후 약 1-2일후에 토압의 증가현상이 생기고, 다시 증가된 토압이 감소하는 현상을 보여준다. 이렇게 타설후 감소된 토압이 다시 증가 및 감소현상을 보이는 원인에 대한 것은 양생에 따른 CLSM의 체적변화와 상관관계가 있을 것으로 판단되고, 또한, 초기에 CLSM에서의 배수효과 및 배수특성과 상관관계가 있을 것으로 판단되나, 이러한 현상에 대한 명확한 설명을 위해서는 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 시간에 따른 토압경감효과는 방식사를 이용한 CLSM이 가장 크게 나타났고, 후란사 및 바다모래를 이용한 CLSM 순으로 나타났다. 실험결과로 판단해 볼 때, 토압경감효과만을 놓고 볼 때, 방식사가 가장 효과적인 재료로 판단된다.



(a) 후란사 CLSM 혼합물

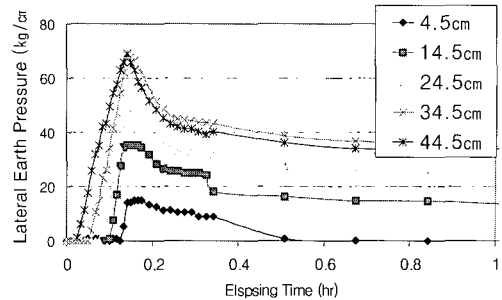


(b) 방식사 CLSM

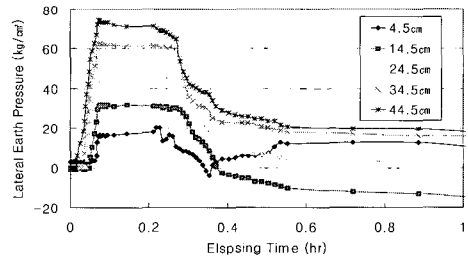


(c) 바다모래 CLSM

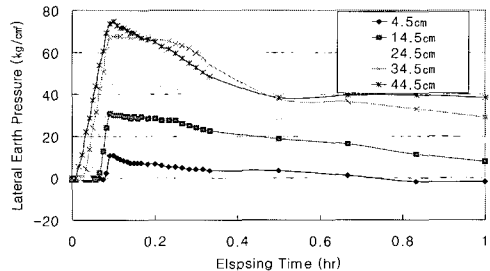
그림 6. 양생시간에 따른 수평토압



(a) 후란사 CLSM 혼합물

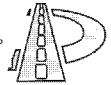


(b) 방식사 CLSM 혼합물



(c) 바다모래 CLSM 혼합물

그림 7. 초기양생시간에 따른 수평토압



6.2 최대수평토압

표 6은 실험에 사용된 CLSM의 종류에 따라 측정된 깊이별 최대수평토압의 크기 및 비교를 위해 바다모래를 이용한 일반 뒤채움재 타설시의 최대수평토압을 비교한 것이다. 앞에서 CLSM의 기본 성질의 설명처럼, CLSM의 옹벽의 시공시 반드시 해결해야 하는 문제중의 하나가 초기에 옹벽에 작용하는 큰 수평토압문제이다. 이는 기존의 발표자료 (조 등, 2000 ; Lee et al. 2001)에 제시된 것처럼 단계별 타설방법을 적용하면 해결할 수 있다. 다만, 본 연구에서는 절개면과 옹벽벽체와의 거리가 작은 경우에 대한 토압의 변화 특성을 검증하고, 특히 일반 뒤채움에서 발생하는 사일로 토압이 CLSM 이용시에도 생기는지를 확인하는 시험이라, 단계별 타설방법 대신 한번에 뒤채움을 모두하고 옹벽에 작용하는 토압의 변화 양상을 검증하였다. 옹벽벽체에 작용하는 깊이별 최대수평토압의 경우 CLSM의 종류에 따라 그 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 그러나, 바다모래를 이용한 일반 뒤채움의 경우에는 CLSM을 타설한 경우에 비해 약 50%이하의 최대수평토압이 작용함을 알 수 있다. 이는 CLSM의 초기 수평토압이 주로 수압과 같이 유동성을 가진 슬러리로 인해 발생하는 것이고, 시간이 지남에 따라 배수가 충분히 진행된다면 일반 뒤채움재 시공과 같이 토압이 크게 경감하였다. 표 6의 결과에서 보여지듯이, CLSM의 옹벽 타설높이는 최대수평토압의 크기와 옹벽의 안정성(활동, 전도)을 고려하여 결정되어야 한다. 이는 기존의 발표자료에서 처럼 옹벽높이의 약 50-60% 정도를 최초 타설하고, 하루정도 양생후 나머지를 타설하면 될 것으로 판단된다(조, 2000, Lee et al., 2001).

표 7은 옹벽에 작용하는 총수평하중 및 이의 작용위치를 나타낸다. 표에서 볼 수 있듯이, CLSM의 단계별이 아닌 한번의 타설시 일반 뒤채움시공에서 발생하는 총수평하중에 비해 약

3-4배 정도의 수평하중이 작용함을 알 수 있다. 이는 옹벽의 안정성에서 활동 및 전도, 또는 옹벽의 단면 안정성에 영향을 줄 수 있음을 의미하므로, 실제 시공시에는 단계별 타설방법을 적용하는 것이 문제의 해결방법이 될 것이다(조, 2000).

표 6. CLSM 종류별 측정된 최대수평토압(g/cm²)

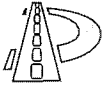
종류	CLSM			일반 뒤채움
	후란사	방식사	바다모래	바다모래
시간 깊이	0.15 h	0.39 h	0.1 h	-
4.5 cm	15.0	20.25	10.80	2.40
14.5 cm	35.26	31.82	30.10	12.04
24.5 cm	46.53	46.06	47.00	14.10
34.5 cm	68.04	62.58	67.64	13.35
44.5 cm	69.01	74.16	74.80	30.8

표 7. 모형옹벽에 작용하는 총수평토압 및 작용위치

뒤채움종류 하중/시간	CLSM			일반 뒤채움
	후란사	방식사	바다모래	바다모래
발생시간 (hr)	0.15	0.39	0.10	-
총수평력 (kg)	2331.7	2330.1	2311.1	735.7
작용점 (cm, 바닥면기준)	18.77	18.69	17.74	17.02

6.3 양생시간에 따른 옹벽의 상하단부의 변위

표 8은 실험에 사용된 CLSM의 종류에 따라 작용하는 토압에 의한 옹벽의 상단부 및 하단부에서의 변위의 발생현황을 보여준다. 표에서 나타난 것과 같이 CLSM의 특성이 그대로 반영된 변위 양상을 보여주고 있다. 즉, 타설직후에 상단 및 저면에서의 변위가 최대가 되고, 양생이 진행됨에 따라 발생한 변위가 감소하는 특성을 보여



준다. CLSM의 경우 발생한 상부 변위는 타설직 후 가장 크게 발생한다. 이때 발생한 상부변위는 주동토압에 의한 뒤택음재 파괴를 고려하여 옹벽의 변위를 뒤택음재의 파괴가 발생하지 않는 범위에서 발생하도록 실험장치를 설정하였고, 표에서 보는 바와 같이 하루정도 지나면 옹벽의 변위는 거의 일정한 값에 수렴한다. 옹벽에 발생하는 변위는 후란사 CLSM이 1.1mm 정도로 가장 크게 나타났고, 바다모래 CLSM의 경우 1.0mm, 방식사 CLSM이 0.75mm로 작게 나타났다. 바다모래만을 이용한 일반뒤택음재 타설시 상부발생 변위는 0.6mm 정도로 CLSM 보다 다소 작게 발생하였다. 이는 앞에서 언급한 CLSM의 특성 및 타설방법에 따른 차이로 보여진다. 즉, 단계별 타설시 옹벽의 상단부에 발생하는 변위량은 더욱 작아질 것이다. 따라서, CLSM을 이용한 뒤택음시 옹벽에 발생하는 변위량은 옹벽의 구조적 안정성에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

표 8. 양생시간별 모형옹벽의 상부 및 저면에서의 변위량(mm)

구분	시간	초기	Peak	12h	1d	2d	3d	4d	5d	
일반 뒤택음	바다모래	상부	0	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	
	바다모래	하부	0	0	0	0	0	0	0	
CLSM	후란사	상부	0	1.25	0.96	1.05	1.07	1.08	1.09	1.10
		하부	0	0.12	0.09	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12
	방식사	상부	0	1.03	0.42	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
		하부	0	0.74	0.59	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65
	바다모래	상부	0	1.02	0.49	0.50	0.55	0.53	0.53	0.53
		하부	0	1.12	1.01	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98

6.4 양생시간에 따른 토압경감효과

표 9는 양생시간에 따른 토압경감효과를 비교한 것이다. 즉, 후란사, 방식사 및 바다모래를 이

용한 CLSM의 토압, 측정된 토압과 비교를 위해 수압, 일반바다모래의 정지토압 및 랜킨토압을 이용하였다. 측정된 수평토압은 비록 초기에 크게 발생하지만 뒤택음재 타설후 약 6시간 이내에 상당부분 감소되므로 실제 옹벽의 뒤택음재 이용시 초기에 발생하는 큰 토압을 단계별 타설방법 또는 가시설을 이용하여 처리한다면 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 특히, 양생시간이 충분히 주어지면 옹벽에 작용하는 토압이 매우 크게 경감되므로 기존의 뒤택음재 타설시 보다 옹벽의 단면을 줄 일 수 있고, 또한, 뒤택음재의 품질을 균일하게 만들 수 있을 것이다.

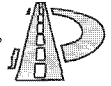
표 9. 양생시간에 따른 토압경감효과 비교 (h:시간, d:일)

구분	비교	시간	Peak	1h	12h	1d	1.5d	2.0d
계산	수압		1.25					
	화강 풍화토	정지	1.10					
		랜킨	0.75					
모형 실험 측정	CLSM	후란사	2.33	1.1	1.38	1.23	0.96	0.61
		방식사	2.33	1.53	0.36	0.65	0.31	0.2
		바다	2.31	0.95	0.5	0.73	0.85	0.88
	일반	바다	0.74					

구분	비교	시간	2.5d	3.0d	4d	5d	6d	7d
계산	수압		1.25					
	화강 풍화토	정지	1.10					
		랜킨	0.75					
모형 실험 측정	CLSM	후란사	0.5	0.42	0.33	0.24	0.14	0.07
		방식사	0.2	0.22	0.24	0.27	0.24	-
		바다	0.82	0.8	0.78	0.72	0.66	0.58
	일반	바다	0.74					

6.5 사일로 토압 평가

표 10은 최대수평토압이 발생하는 시간에서의 깊이별 수평토압을 표시하였다. 또한, 일반 뒤택



움재인 바다모래의 뒤채움으로 인한 깊이별 수평 토압을 같이 표시하였다. 표에서 계산값은 후란사 CLSM의 양생시간에 따른 단위중량 및 삼축압축 시험에서 얻어진 내부마찰각을 이용하여 계산된 토압값이다. 계산에는 랜킨의 주동토압계수를 이용하여 사일로토압론을 적용하여 토압을 계산하였다. 계산된 토압값과의 비교를 위해 실측치를 표에 제시하였다.

표 10. 사일로 토압검증을 위한 계산된 토압 및 실측된 토압

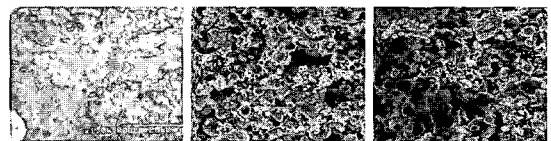
구분	깊이 양생 시간	4.5	14.5	24.5	34.5	44.5		
		cm	cm	cm	cm	cm		
후란사 CLSM 계산값 (양생시간별 내부마찰각 이용)	1 일	2.39	7.42	12.06	16.36	20.33		
	2 일	2.18	6.77	11.04	15.01	18.70		
	3 일	2.16	6.72	10.95	14.89	18.55		
	5 일	1.89	5.91	9.68	13.20	16.51		
	7 일	1.83	5.72	9.36	12.77	15.94		
측정값	일반 뒤채움	바다 모래	-	2.40	12.04	14.10	13.35	30.80
			후란 사 CLS M	1 일	3.00	17.20	21.62	36.54
	2 일	3.00		16.34	16.92	13.02	12.36	
	3 일	3.75		11.18	15.98	5.88	6.18	
	5 일	9.00		8.60	7.52	2.52	0.00	
	7 일	8.25		7.74	1.41	0.00	0.00	
	방식 사 CLS M	1 일	5.25	5.16	8.46	30.66	16.48	
		2 일	7.50	3.44	3.76	3.78	3.09	
		3 일	0.00	5.16	1.41	1.68	14.42	
		5 일	3.00	4.30	2.35	1.68	15.45	
		바다 모래 CLS M	1 일	0.00	22.36	2.35	13.80	34.10
	2 일		0.00	20.64	2.82	16.47	41.48	
	3 일		0.60	19.78	3.76	16.47	38.50	
	5 일		0.00	17.20	3.76	15.13	34.10	

표에서 알 수 있듯이 바다모래를 이용한 일반 뒤채움의 경우 뒤채움폭이 응력높이의 약 50%이므로, 바다모래를 이용한 일반 뒤채움의 경우 사일로 토압이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 본 모형응력실험 방법과 상당한 관계가 있는 것으로 판단된다. 즉, 현장에서의 뒤채움타설과

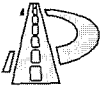
같은 방법을 적용하여 뒤채움과정에서 발생하는 응력의 변위를 응력의 주동토압에 의한 최대변형 정도 까지만 허용한 것으로, 기존의 다른 모형응력 실험방법, 즉 뒤채움 완료후 인위적으로 변위를 주는 형태의 시험과는 다소 다른 경향을 나타낸 것으로 판단된다. 또한, 모형응력실험에서 CLSM의 뒤채움시 역시 이러한 사일로토압 현상이 발생하지 않았다. 즉, 이는 초기 유동성을 가지는 CLSM에서 브리지구조 형성이 없고, 양생에 따른 토압경감효과가 매우 크게 나타났다. 이는 CLSM이 기존의 뒤채움재와는 그 물리적 특성이 매우 다른 재료임을 의미하므로, 기존의 토압론의 적용에 있어서 매우 신중하여야 할 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 예상된다.

6.6 SEM을 이용한 미세구조 평가

그림 8은 CLSM 뒤채움재의 타설시 재료분리 현상에 대한 가능성을 확인하기 위해 전자주사현미경을 이용하여 뒤채움시료의 상단부, 중단부, 하단부에서 시료를 채취하여 미세구조를 비교한 것이다. 시료의 양생시간은 약 7일이고, 바다모래를 이용한 CLSM이다. 3장의 실험시료에서 설명된 것과 같이 바다모래의 입경이 후란사, 방식사, 생형사등에 비해 약간 크므로, 큰 입경의 잔골재를 이용한 CLSM에 재료분리가 발생하지 않는다면, 입경이 작은 다른 경우에는 재료분리현상에 대한 문제는 없을 것으로 판단된다.



(a) 상단부 (b) 중단부 (c) 하단부
그림 8. SEM을 이용한 바다모래CLSM의 높이에 따른 미세구조 특성



7. 결론 및 향후연구

(1) 폐주물사에서 환경오염 가능성이 매우 적은 폐주물사를 마그네슘용액 처리한 방식사의 CLSM용 잔골재 이용이 가능한 것으로 나타났고, 또한 응벽뒤채움재 적용시 응벽에 작용하는 토압 경감효과가 다른 잔골재에 비해 좋은 것으로 나타났다.

(2) 응벽의 뒤채움시 한번에 응벽의 전높이를 CLSM으로 타설시 타설직후 비교적 큰 토압이 응벽벽체에 작용하고, 특히, 총수평력의 경우 바다모래를 이용한 일반 뒤채움의 경우에 비해 약 3배 정도의 큰 수평력이 작용하는 것으로 나타났다. 그러므로, 현장에서의 시공시에는 응벽의 활동 및 전도에 관한 안정성을 평가한 후, 적절한 타설높이를 이용하여 시공하면 무리가 없을 것으로 판단된다.

(3) CSLM의 응벽뒤채움재 타설시 발생한 토압의 경감효과는 사용된 잔골재에 따라 다소 다르게 나타났고, 이는 주로 잔골재의 입도 및 입경에 의한 배수효과와 직접적인 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 본 연구에 적용된 잔골재 중에 방식사의 토압경감효과가 비교적 크고, 빠르게 나타났다.

(4) CLSM 뒤채움재의 시공시 초기 유동특성에 의한 재료분리효과를 확인하기 위해 전자주사현미경(SEM)을 이용하여 응벽에 뒤채움한 후 7일 양생된 시료를 채취하여 미세구조를 분석한 결과 초기 유동특성에 의한 재료분리 현상은 거의 없는 것으로 나타났다. 다만, 사용될 잔골재의 입경을 클 경우 재료분리 현상이 발생할 개연성이 크므로, 시공전 반드시 이 부분을 확인한후 타설높이 결정에 반영하는 것이 바람직 할 것으로

판단된다.

(5) CLSM의 경우 일반 뒤채움재의 이용시 발생가능한 사일로토압효과가 없는 것으로 실험결과 나타났다. 이는 CLSM의 재료적 특성에 의한 것으로 초기유동성 및 시간에 따른 시멘트 및 플라이애쉬의 강도발현과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 응벽높이의 50% 폭에 대한 내용만 검증되었으므로, 25% 폭 및 단계별 타설방법에 따른 효과가 추가로 검증되어야 할 것이다

(6) CLSM 뒤채움재의 타설후 약 2-3일사이에 발생하는 토압증가 현상에 대한 규명이 필요하다. 토압증가효과는 사용된 잔골재의 종류에 따라 그 크기 및 발생시간에 다소 차이는 있지만, 토압의 증가원인에 대한 규명이 되면 이에 대한 적절한 감소대책을 강구할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국과학기술부, 한국과학재단에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행 결과입니다. 또한, 열악한 환경의 실험실에서 열심히 실험을 도와준 배성호, 박재현, 김현오, 김희영 학생에게 고마움을 포함합니다.

참고문헌

1. 이무강 (1998), "폐주물사를 이용한 방식재 제조 기술", 산업자원부 연구보고서, pp. 119
2. 조재운 (2000), "폐주물사 혼합재를 이용한 유동성 뒤채움재의 지반공학적 적용성 연구", 박사학위논문, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과, pp. 179.
3. 조재운, 이관호, 이인모 (2000), "유동특성을 이용



- 한 폐주물사 혼합물의 응벽뒤채움재 연구”, 한국
지반공학회, Vol. 16, No. 4, pp. 17-30
4. 한국전력공사 기술연구소 (1992), “석탄회의 성
토재로서의 이용 방안”, KRC-90H-J06
 5. Abichou, T., Benson, C., and Edil, T. (1998),
“Beneficial Reuse of Foundary Sands in
Construction of Hydraulic Barrier Layers”,
Environmental Geotechnics Report 98-2, Dept.
of Civil and Environmental Engineering,
University of Wisconsin-Madison.
 6. ACI Committee 229 (1994), “Controlled Low Strength
Materials(CLSM)”, *Concrete International*, July, pp.
55-64
 7. ASTM (1994), *Annual Book of ASTM Standards*
 8. Bhat, S. T., and Lovell, C. W. (1996), “Use of
*Coal Combustion Residues and Waste
Foundry Sands in Flowable Fill*”, Joint
Highway Research Project, FHWA
/IN/JHRP-96/2, pp. 222.
 9. Frydman, S. and Keissar, I. (1987), “Earth
Pressure on Retaining Walls near Rock
Faces”, *JGE, ASCE, Vol. 113, No. 6*, pp.
586-599
 10. Handy, R. L. (1985), “The Arch in Soil
Arching”, *JGE, ASCE, Vol. 111, No. 3*, pp.
302-318
 11. Horiuchi, S., Taketsuka, M., Odawara, T., and
Kawasaki, H. (1992), “Fly-ash Slurry Island: I.
Theoretical and Experimental Investigations”,
Journal of Materials in Civil Engineering,
Vol. 4, No. 2, May, pp. 117~133
 12. Janardhanam, R., Burns, F., and Peindl, R. D.
(1992), “Mix Design for Flowable Ffly-ash
Backfill Material”, *Journal of Materials in
Civil Engineering, ASCE, Vol. 4, No.3*,
August, pp. 252~263
 13. Krynine, D. P. (1945), “Stability and Stiffness
Celular Cofferdams”, *Terzaghi Transaction*,
ASCE, Vol. 110, pp. 1175-1178.
 14. Lee, K., Cho, J., Rodrigo, S. and Lee, I
(2001), “The Small-Scale Retaining Wall
Test of Waste Foundry Sand Mixture as
Flowable Fill”, *ASTM Geotechnical Testing
Journal, Vol. 24, No. 4*, pp. 401-408
 15. Marston, A. and Anderson, A. O. (1913),
“Theory of Loads on Pipes in Ditches and
Tests of Cement and Clay Drain Tile and
Sewer Pipe”, *Bul. 31, Iowa Engrg.,
Experiment Station, Ames, Iowa*.
 16. Naik, T. R., and Singh, S. S. (1997), “
Flowable Slurry Containing Foundry Sands”,
Journal of Materials in Civil Engineering,
Vol. 9, No. 2, May, pp. 93~102
 17. Nantung, T. E. (1993), “*Design Criteria for
Controlled Low Strength Materials*”, Ph. D.
Thesis, School of Civil Engineering, Purdue
University, Aug., pp 344
 18. Smith, A.(1991), “Controlled Low Strength
Material” *Concrete Construction*, May, pp
389~398

(접수 : 2001. 12. 17)