

유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 옹벽뒷채움재 연구

A Study on the Flowable Backfill with Waste Foundry Sand for Retaining Wall

조 재 윤*¹ Cho, Jae-Yun

이 관 호*² Lee, Kwan-Ho

이 인 모*³ Lee, In-Mo

Abstract

The objective of this study is to evaluate the lateral earth pressure and the stability of small scale retaining wall with waste foundry sand (WFS) mixtures as a controlled low strength materials (CLSM). Three different types of WFS, like Green WFS, Hurane WFS and Coated WFS, were used in this study, and fly ash of Class F type was adopted. To evaluate the lateral earth pressure and the stability of retaining wall, two different small scale retaining wall tests, which are called an artificially controlled strain method and a natural strain method, were carried out. In case of an artificially controlled strain method, the coefficient of lateral earth pressure, just after backfilling of WFS mixtures, was around 0.8 to 1.0, and most of earth pressure was dissipated within 12 hours. In case of a natural strain method, two steps of stage constructions were employed. The mixtures of Hurane WFS and Coated WFS showed fast decrease of earth pressure due to a relatively good drainage. Judging from the stability of retaining wall for overturning and sliding, two steps of stage construction for 2 days were enough to finish the backfill of 6-m height of retaining wall. Also, considering the curling effect of WFS mixtures, the stability of retaining wall increased as curling time increased.

요 지

본 연구의 목적은 폐주물사-플라이애쉬 혼합재료의 옹벽 뒷채움재 이용시 옹벽에 작용하는 토압과 안정성에 대한 특성을 평가하는 것이다. 세 종류의 폐주물사(생형사, 후란사, 코티드사)와 ASTM 분류 기준 F등급의 플라이애쉬를 이용한 유동성 뒷채움재의 옹벽 적용성 평가를 위해 인위적 변위제어실험 및 자유변위제어실험을 이용하여 모형옹벽실험을 수행하였다. 인위적 변위제어실험의 경우 유동성 뒤채움의 타설 직후 토압계수의 크기는 0.8 ~ 1사이의 값으로 나타났고, 약 12시간이 경과하면 옹벽에 작용하는 토압이 상당부분 저감되었다. 2단계 타설 방법을 적용한 자유변위실험의 경우, 슬러리 형태의 유동성 뒤채움재의 타설 초기에 후란사와 코티드사 혼합재는 빠른 배수효과에 의해 토압 경감 효과가 빨리 나타났지만, 1일 후의 토압은 같은 양생시간의 생형사에 비해 크게 유지되었다. 모형실험의 자유변위제어 실험결과를 이용한 안정성 해석으로부터 6m 옹벽에 타설할 수 있는 뒤채움재의 시공단계별 1차타설 높이 및 2차타설 높이는 생형사의 경우 3.9m 및 3.57m, 후란사의 경우 4.07m 및 3.64m, 코티드사의 경우 3.86m 및 3.54m, 혼합사의 경우 3.9m 및 3.44m로 결정되었고, 실제 옹벽의 뒤채움 높이가 5.4m보다 크므로 2단계 시공으로 옹벽의 뒤채움을 완공할 수 있는 것으로 판정되었다. 또한 재료의 양생특성에 따른 옹벽의 안정성은 양생기간이 경과함에 따라 더욱 증가되는 결과를 나타내었다.

Keywords : Controlled low-strength material(CLSM), Flowable backfill, Fly-ash, Lateral earth pressure, Retaining wall, Waste foundry sand(WFS)

*1 정회원, 동의공업대학 토목과 부교수

*2 정회원, 경성대학교 공과대학 건설·환경공학부 조교수

*3 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

1. 서론

유동성 뒷채움재는 저강도 콘크리트 개념을 지반공학에 적용하여 만들어진 것이다. 유동성 뒷채움재(flowable fill)는 비수축 채움재(unshrinkage fill), 강도조절 채움재(controlled strength fill), 유동성 모르타르(flowable mortar), 흙-시멘트 슬러리(soil-cement slurry), K-Krete 등으로 불리고, 이의 대표적인 특성은 자기수평능력(self-leveling), 자기다짐(self-compacting), 유동성(flowability), 인위적인 강도조절, 시공 후 재굴착이 용이하다는 것이다(Abichou et al., 1998, Bhat & Lovell, 1996, Horiuchi et al., 1992, Janardhanam et al, 1992, Naik & Singh, 1997). 이러한 다양한 특성을 가진 유동성 혼합재료는 기존의 뒷채움재 사용시 발생하는 부적절한 다짐(과다다짐 또는 빈다짐)으로 인해 발생하는 문제를 해결할 수 있다. 예를 들어, 옹벽에 적용시 뒷채움 및 다짐으로 인해 발생하는 토압의 증가 및 옹벽의 안정성 문제, 원형지하매설물의 뒷채움재 시공시 과다다짐으로 인한 구조물손상, 부적절한 다짐으로 인한 침하문제 등을 해결할 수 있는 새로운 개념의 지반재료라 할 수 있다. 따라서, 기존의 뒷채움재의 단점을 획기적으로 보완할 수 있는 유동성 뒷채움재의 개발, 혼합재료의 특징 및 지반공학적 적용성, 적절한 배합설계 및 시공법 등에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

산업폐기물 중 플라이애쉬는 석탄을 연료로 쓰고 있는 화력발전소들로부터 연간 200만 톤 이상 발생되나 이중 15%정도만이 콘크리트 혼화재, 시멘트 원료, 벽돌이나기와 제조 등의 한정된 분야에 활용되고 있을 뿐이다. 나머지 발생량은 대부분 화력발전소에 인접한 매립부지를 조성, 물과 혼합하여 매립하고 있는 실정이다. 또한, 주물공장의 부산물인 폐주물사(WFS : Waste Foundry Sand)는 국외에서는 잔골재의 대용으로 연구가 활발했으나 (Ali et al.,

1996, Hamernik & Frantz, 1991, Javed, 1994, Naik et al., 1994, Xu & Sankar, 1994), 국내에서는 그 양이 크게 문제 시되지 않아 그간 재활용 연구대상에서 제외되어 왔으나, 발생 물량이 막대하고 여러 해 동안의 누적량이 상당하여 이제는 방치할 수 없는 단계에 이르렀다. 주물단지의 주물 공장들은 매년 이 부산물의 처리에 많은 비용을 지출하고 있다. 환경부 자료에 의하면 92년 연 48만 톤 가량의 발생 폐기물에 대한 폐기장소 물색 등에 있어서 매우 큰 어려움을 겪고 있다. 이에 본 연구진은 지난 97년도부터 “폐주물사의 건설자원화”라는 주제로 산업부산물인 폐주물사와 플라이애쉬를 이용한 혼합물을 유동성 뒷채움재로 사용하기 위한 구체적인 배합비 및 이에 대한 지반공학적인 물성치를 평가와 관련된 1차 연구를 수행하였다 (이 등, 1999, Lee et al., 2000). 본 논문은 2차 연구 내용으로, 주로 1차년도에서 개발된 폐주물사를 이용한 유동성 뒷채움재의 옹벽 뒷채움재 활용을 위한 적용성 평가로서 모형옹벽 실험을 통해 뒷채움재 타설직후의 초기토압, 양생시간에 따른 토압감소효과, 옹벽의 안정성, 단계별 타설가능 높이 등에 대한 연구를 수행하였다. 본 2차 연구에 이어 진행중인 연구내용은 폐주물사를 이용한 유동성 뒷채움재의 지하매설물 적용성에 대한 연구를 수행할 예정이다.

2. 시험시료 및 설계배합비 결정

2.1 시험시료

본 연구에 사용된 폐주물사의 종류는 생형사(Green Sand), 후란사(Furane Sand), 코티드사(Coated Sand)로 주형 및 사용된 점결제에 따라 분류된다. 생형사는 벤토나이트와 물이 점결제로서 사용된 주물사이며, 후란사는 유기물질, 코티드사는 무기물질이 점결제로서 사용된 주물사이다.

표 1. 폐주물사의 입도결과분석

구분	생형사	후란사	코티드사
D ₁₀	0.14	0.20	0.14
D ₃₀	0.21	0.34	0.20
D ₆₀	0.25	0.57	0.22
C _v (균등계수)	1.79	2.85	1.57
C _c (곡률계수)	1.26	1.01	1.30
분류	Poorly graded	Gap graded	Poorly graded

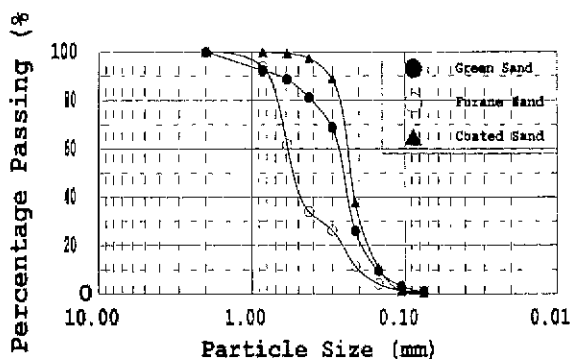


그림 1. 폐주물사의 입도분포

표 2. 플라이애쉬 및 각 폐주물사의 성분분석결과

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	L O I.
플라이애쉬	60.33	24.78	3.82	1.06	0.00	2.39	0.84	0.86	0.59	0.50	4.84
생형사	80.74	7.92	2.75	0.22	0.00	0.71	0.48	2.27	1.43	0.02	3.46
후란시	87.04	5.45	0.91	0.19	0.00	0.19	0.04	2.67	0.66	0.01	2.85
코티드사	81.50	5.31	1.41	0.08	0.00	0.16	0.00	2.91	0.59	0.01	8.01

표 3. 폐주물사 혼합물의 설계배합비(φ5cm×15cm mold)

	생형사		후란사		코티드사	
	중량(g)	비율(%)	중량(g)	비율(%)	중량(g)	비율(%)
플라이애쉬	42.43	8.1	94.95	17.1	84.70	15.7
폐주물사	339.84	64.7	344.63	61.9	320.55	59.5
물	126.99	24.2	107.69	19.4	118.27	21.9
시멘트	15.81	3.0	9.15	1.6	15.65	2.9
합계	525.07	100.0	556.42	100.0	539.17	100.0

각 폐주물사 종류에 따른 입도분포곡선 및 입도분석결과는 그림 1 및 표 1에 나타내었다. 각 폐주물사의 비중은 생형사는 2.377, 후란사는 2.459, 그리고 코티드사는 2.424로 나타났다. 폐주물사의 구성성분 분석을 위해 XRF (X-ray Refraction) 실험을 수행하였고, 결과는 표 2에 나타난 것과 같이 원재료가 모래인 만큼 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃가 90% 이상 차지하였다. 특히, 코티드사의 경우 폐놀 수지 등으로 코팅되어 있으므로, 시험준비중에 손실되는 양이 많음을 알 수 있다.

플라이애쉬는 대안화력발전소에서 발생한 것이며, 시멘트에 혼합하기 위해 정제하기 바로 전 단계의 것으로 그 화학적 조성은 표 2와 같다. 본 플라이애쉬는 ASTM시방서 F등급에 해당하며, 비중은 2.170이었다. 시멘트는 KSL 5201에서 규정한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

2.2 설계배합비 결정법

본 연구의 실험을 위한 시료의 배합비는 Nantung(1993)이 제안한 실린더형 실험기기를 이용한 유동실험과 일축압축실험결과를 이용하여 결정하였다. 배합비 결정 과정 및 각종 지반공학 물성치에 관한 자세한 내용은 윤(1999) 및 조(2000)의 논문에서 자세하게 나타나 있다. 유동실험과 일축압축실험결과로부터 결정된 최종배합비는 표 3에 나타난 것과 같다.

3. 모형옹벽실험 장치

3.1 모형 토조

모형 실험에 사용된 모형 토조는 그림 2와 같으며, 토조의 크기는 100cm×52cm×50cm(가로×세로×높이)이고, 토조의 측면도 및 평면도는 그림 3과 같다. 측벽의 한쪽

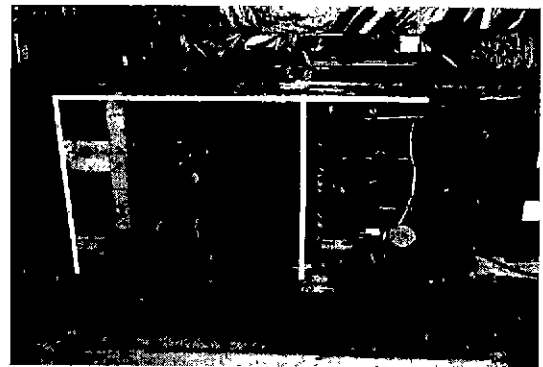


그림 2. 모형옹벽실험장치

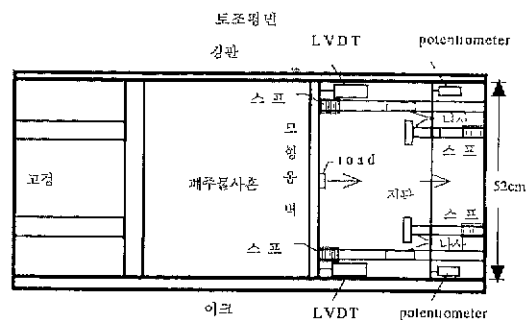
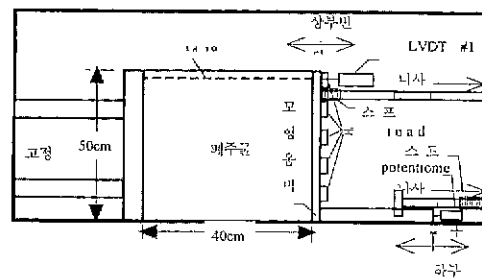


그림 3. 모형옹벽 측면도 및 평면도

은 아크릴판($t=50\text{mm}$)으로 되어 있으며, 실험시 폐주물사와 벽체의 거동, 그리고 각 계측장치를 관찰할 수 있게 하였다. 다른 측벽과 저면은 실험시 변형이 발생하지 않도록 강판으로 제작하고 채널형강으로 보강하였다. 실험시 시료와의 마찰을 제거하기 위해 토조의 측벽에 윤활제를 뿌리고 비닐을 씌웠다. 토조의 바닥은 미끄러짐을 방지하기 위해 에폭시를 바르고 표준사를 뿌려 편편하게 하였다.

3.2 모형 옹벽

본 실험에 사용된 모형옹벽의 크기는 $50\text{cm} \times 52\text{cm}$ (높이 \times 폭)이다. 재질은 강판($t=7\text{mm}$)이며, 채널형 강으로 보강하였다. 모형옹벽에 작용하는 수평토압을 측정하기 위해 그림 4와 같이 옹벽 전면에 10cm 간격으로 5개의 로드셀을 옹벽 중앙에서 세로 방향으로 설치하였다. 로드셀을 모형 옹벽에 설치한 후 하중전달판을 로드셀에 설치하였으며, 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. 뒷채움 후 발생하는 옹벽의 상부 및 하부 변위를 측정하기 위하여 옹벽의 상, 하단에 각각 2개의 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 2개의 포텐소미터를 설치하였다.

3.3 실험방법

본 연구에서는 두 가지의 실험방법을 이용하여 모형 옹벽에 작용하는 토압의 측정 및 해석을 수행하였다. 1차 실험으로 인위적 변위제어 실험을 이용하였다. 이 실험은 옹

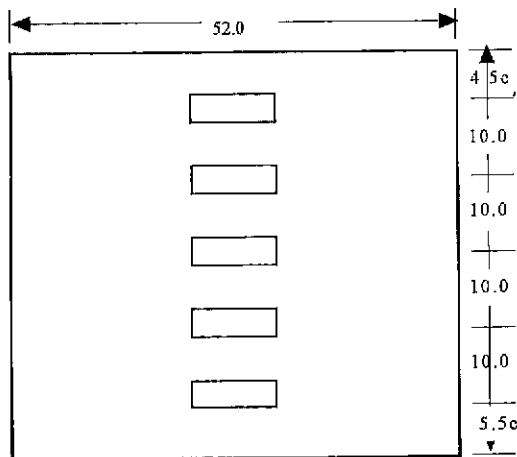


그림 4. 로드셀 위치

벽에 작용하는 토압의 크기를 지속적으로 측정하면서 시간에 따라 옹벽의 뒷채움재가 주동방향의 변위를 일으키도록 인위적인 변위제어를 하였다. 이 실험의 주목적은 옹벽의 뒷채움재를 단 한번에 타설한 뒤 옹벽에 작용하는 토압의 크기를 측정하여, 본 연구에 이용된 재료의 특성 중앙생으로 인한 강도증진과 토압경감 효과를 확인하는 것이다.

2차 실험에서는 유동성 뒷채움재를 타설하였을 때 그 토압에 의해 옹벽이 스스로 변위를 일으킬 수 있도록 스프링을 옹벽 상하부에 설치하였다. 2차 실험에서는 현장에서 옹벽의 시공 및 뒷채움 과정을 재현하기 위해 1차 실험과는 달리 두 단계로 나누어 뒷채움재를 타설하였다. 본 연구에 적용된 해석용 옹벽의 높이가 6m 이며, 실내실험결과를 이용한 안정성 해석 결과를 근거로 단계별 타설시 1차 타설 가능 높이가 약 3.6m 이고, 2차 타설 높이는 약 2.4m 정도로 결정되었다(윤, 1999). 이를 근거로 2차 실험에서는 모형 옹벽 높이의 절반씩 나누어 2일 동안 두 단계에 걸쳐서 뒷채움재를 타설하였다.

4. 모형 옹벽 실험 결과 및 해석

4.1 인위적 변위제어 실험 결과

4.1.1 인위적 변위의 증가

각 폐주물사 혼합물의 타설로 인한 옹벽의 변위는 주로 벽체의 하부보다는 상부에서 크게 발생하였다. 변위의 크기는 시간이 경과함에 따른 각 폐주물사 혼합물의 양생특성과 관계가 있다. 즉 각 폐주물사 마다 타설 초기에 발생하는 다른 배수능력으로 인한 뒷채움의 변형정도, 그리고

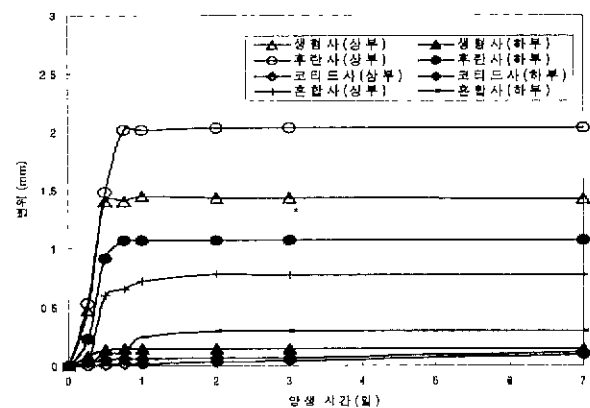


그림 5. 각 시료별 양생시간에 따른 변위

점착력의 조기 발생 유무에 의한 초기 강도의 발현 능력 등과 관계가 있다. 그림 5에 의하면, 후란사의 변위가 가장 크며, 생형사, 혼합사, 코티드사의 순서로 나타난다. 또한, 각 폐주물사 혼합재료의 토압계수의 변화는 대체적으로 양생시간에 따라 변위의 증가와 더불어 토압은 감소하는 비슷한 형태를 나타내었고, 코티드사의 경우 가장 작은 변위 값을 보였다. 혼합사는 주물공장 및 생산과정에 따라 약간의 차이는 있으나, 여기서는 주물공장에서 발생하는 생형사, 후란사, 코티드사의 중량비에 의하여 각각 3:4:2의 비율로 배합하여 혼합사를 만들었다. 이는 주물공장에서 폐주물사 재료별 분리수거가 이루어지지 않을 경우 폐주물사의 배출이 혼합상태로 되기 때문이다.

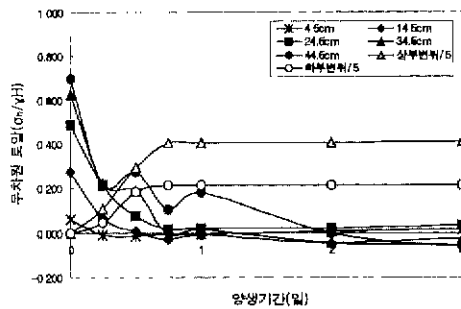
4.1.2 깊이별 양생시간과 토압관계

본 연구에 사용된 유동성 뒷채움재의 중요한 지반공학 적 특성치는 응력 뒷채움재로 타설한 초기에 보이는 유동 특성과 시간이 경과함에 따라 강도가 발현되는 것이다. 즉, 콘크리트가 양생되면서 강도가 증진되는 것과 같이 유동성 뒷채움재에서도 시멘트에 의한 포졸란 반응이 생기고, 특히 재료의 유동특성에 영향을 주는 플라이애쉬 역시 이러한 강도증진 효과에 일부 역할을 수행한다. 그러나 전체 혼합물 중량에서 시멘트의 사용량이 약 2~3%이하이므로 엄밀하게 말하면, 콘크리트와는 다른 오히려 지반에 가까운 재료특성 및 거동을 보인다고 볼 수 있다. 그림 6(a)와 (b)는 후란사와 코티드사 혼합물의 양생시간에 따른 모형응력에 작용하는 토압의 변화를 보여준다. 해석을 단순화하기 위해 측정된 수평토압을 바닥에서의 최대연직응력으로 나눈 값으로 정의되는 무차원 토압을 이용하였다. 전체적인 거동특성으로는 유동성 뒷채움재의 타설 후 약

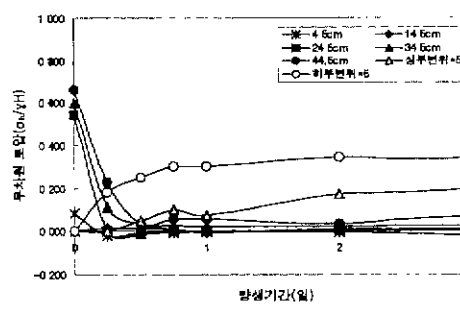
6시간 정도 지나면 모형구조물에 작용하는 토압이 80% 이상 감소되는 것을 보여준다. 이러한 빠른 토압 경감 효과는 유동성 뒷채움재를 모형응력토조에 타설했을 때, 토조의 윗 부분과 아랫부분을 통해 상당량의 물이 배수가 되고, 또한 자중에 의한 압밀 현상 또는 침강현상으로 인해 토압 경감효과가 빨리 나타나는 것으로 판단된다. 토압의 경감효과는 사용된 폐주물사의 종류에 따라 약간의 시간적 차이를 보여준다. 생형사와 코티드사 혼합물은 빠른 토압 경감 효과에 의해 1일 이전에 토압은 거의 일정하게 되었다. 생형사의 경우 벤토나이트 성분을 함유하여 점성이 발휘되기 때문에 다른 재료에 비해 상대적으로 토압 경감 효과가 크게 나타났다.

4.1.3 양생시간에 따른 깊이와 토압 및 토압계수

그림 7은 깊이에 따른 양생시간과 무차원 토압과의 관계를 보여준다. 전체적인 거동특성은 유동성 뒷채움재의 타설 직후 토압의 크기는 정수압의 분포보다는 약간 작은 값을 보여준다. 그러나, 기존의 응력 뒷채움재로 이용되는 흙의 사용시보다 초기에 응력에 작용하는 토압이 크다는 것을 알 수 있다. 타설 직후 발생하는 이러한 큰 토압은 결국 시공방법에도 영향을 줄 것으로 판단된다. 실험에 사용된 모든 재료의 경우 유동성 뒷채움재의 타설 후 약 12시간 정도 경과하면 응력에 작용하는 토압의 상당부분이 저감되는 것을 볼 수 있다. 이는 5장의 응력의 안정성, 즉 전도와 활동에 대한 안정성과 밀접한 관계가 있다. 결국 응력의 안정성은 유동성 뒷채움재의 타설 높이와 타설 후 경과 시간에 영향을 받는 것으로 판단할 수 있고, 초기의 응력의 안정성 문제만 해결된다면 뒷채움재 타설 1일 후부터는 응력의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.



(a) 후란사 혼합물



(b) 코티드사 혼합물

그림 6. 깊이에 따른 양생시간과 무차원토압

결정된 토압계수는 로드셀 각각의 위치에 작용하는 유동성 뒷채움재의 연직하중과 로드셀에서 측정된 수평력을 이용하였다. 계산된 토압계수는 깊이에 따라 양생시간을 고려한 토압의 분포와 비슷한 경향을 보여주는 하나, 시공직후 타설된 뒷채움재를 고려한 토압계수의 경우 그 크기가 0.8에서 1정도로 산정되었다. 이러한 정도의 토압계수가 의미하는 것은 재료의 초기 유동특성이 반영된 것이라 할 수 있다. 앞서서도 언급한 것과 같이 초기 유동특성이 다짐이라는 시공법을 생략할 수 있는 좋은 공학적 특성치이기는 하지만, 옹벽의 안정성 문제를 고려한다면 시공직후부터 약 하루정도까지는 적절한 옹벽의 안정성을 확보하기 위해서 정확한 시공과 주의를 기울여야 한다.

4.2 자유변위 제어방법을 이용한 실험결과

4.2.1 시간에 따른 자유변위의 증가

자유변위실험결과 그림 8에 나타난 것과 같이, 1일 이내의 변위는 모든 시료가 거의 비슷하게 발생하였다. 1일 후의 2차 타설시에 모든 시료는 추가적인 변위가 발생하였고, 후란사의 변위가 가장 크게 나타났다. 특히 생형사의 경우 벽체 하단의 변위는 2차 타설에 관계없이 일정한 값을

을 보였고, 이는 옹벽저부의 1일 후의 토압이 안정되게 감소하고 있다는 것을 보여주었다. 대체적으로 양생시간에 따라 변위의 증가와 더불어 토압은 감소하는 비슷한 형태를 나타내며, 생형사의 경우 상부변위는 초기의 값을 일정하게 유지하지만, 옹벽하부의 변위는 초기에 약간 증가하는 경향을 보여준다. 이것은 생형사의 초기타설시 배수가 느리게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 2차 타설시에 옹벽하부의 변위는 거의 없고 상부의 변위만 생기지만 기존 뒷채움에 추가적인 토압 변화는 거의 발생하지 않으며, 역시 1차 타설 부분은 1일 이내에 안정적으로 감소하게 된다. 후란사의 경우 하부토압계수가 초기에 일단 감소되었다가 증가하면서 옹벽상하부의 변위가 모두 조금씩 증가하는 경향을 보인다. 2차 타설시에 옹벽의 상하부의 변위가 모두 발생하지만 상부의 변위는 더욱 크게 발생하며, 이로 인하여 옹벽하단의 토압은 급격하게 감소하게 되는 전형적인 폐주물사 뒷채움의 단계적 뒷채움 과정을 보여준다.

4.2.2 깊이별 양생시간과 토압관계

그림 9 (a), (b), (c)는 생형사, 후란사, 및 코티드사 혼합

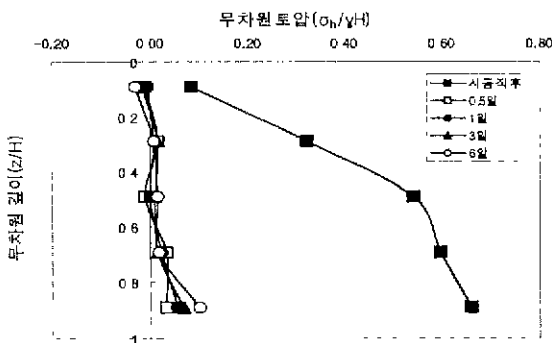


그림 7. 양생시간에 따른 깊이와 토압 관계 (코티드사)

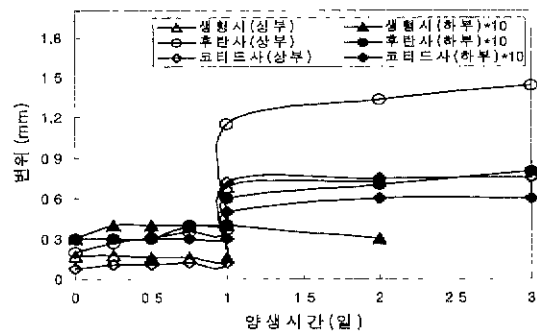
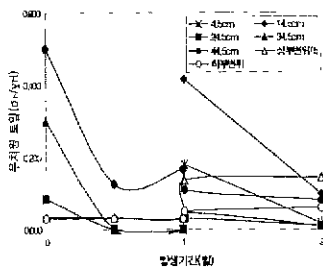
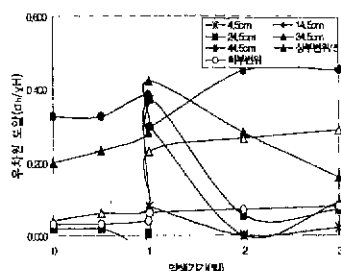


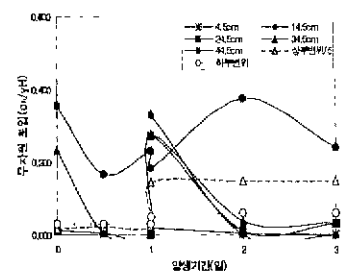
그림 8. 각 시료별 양생시간에 따른 자유변위



(a) 생형사



(b) 후란사



(c) 코티드사

그림 9. 양생시간과 토압관계 (자유변위실험)

물을 이용한 단계별 뒷채움 시공시 깊이에 따른 양생시간과 토압과의 관계를 보여준다. 그림 9(a)에 나타난 생형사의 경우, 초기 타설시에 토압이 가장 크게 나타났다. 초기 생형사 혼합물은 마치 모르타르와 같으며, 수분을 흡착하려는 성질이 있으므로 재료분리가 발생하지 않고 배수가 느리게 진행되는 것이 그 원인이지만, 그 이후 토압은 빠르게 감소한다. 2차 타설로 인한 1차타설 뒷채움재의 토압 증가효과가 다른 혼합물보다 매우 작게 나타났다. 2차타설에 의한 연직응력이 증가되었지만 벽의 중간지점인 깊이 24.5cm, 34.5cm에서의 수평토압 증가는 매우 작다. 또한 벽체저부인 44.5cm위치에서는 오히려 토압이 감소되었으며, 2차타설이 완료된 이후 더 이상의 증가가 없이 일정해졌다. 이것은 2차타설에 의한 벽체 상하부에 추가적인 변위가 발생하는 것과 1일이 지난 시료가 이미 경화되면서 점착력이 빠르게 발휘되고 있으므로 거의 자립하고 있다는 것이 주된 이유이다. 그림 9(b)와 (c)에 나타난 후란사와 코티드사의 경우 2차 타설에 의한 영향이 생형사와 비슷하지만, 각각 24.5cm, 34.5cm 위치에서 토압증가는 상대적으로 크다. 하지만 시간이 경과하면서 토압은 급격하게 감소하는 경향을 보여준다. 대체적으로 토압감소는 잘 이루어지며, 시간이 경과함에 따라, 후란사 보다는 코티드사 혼합물의 토압 경감 효과가 약간 빠르게 나타난다.

4.2.3 양생시간에 따른 깊이별 토압분포도

그림 10(a), (b), (c)는 생형사, 후란사, 및 코티드사를 이용한 단계별 뒷채움 시공시 양생시간에 따른 깊이별 토압을 보여준다. 타설직 후 토압은 깊이에 따라 마치 수압과 같은 형태로 작용하였고, 다음단계 타설 전까지 토압의 감소효과가 크음을 알 수 있다. 또한 그림에서 2차 뒷채움재 타설 직전과 직후의 토압의 변화를 보면 2차 타설로 인해 상

부에 가해지는 토압은 수압과 같은 형태지만, 기존의 타설 부분에서의 토압의 증가 효과는 상당히 작은 것으로 나타났다. 생형사의 경우 타설초기 토압은 느린 배수로 인해 크지만, 1일 양생 후의 토압은 가장 작게 나타난다. 후란사와 코티드사는 생형사보다 초기에 배수되는 물의 양이 많아 상대적으로 작은 토압값을 보여주었다. 이는 생형사의 벤토나이트 성분이 물을 함유하는 성질이 큰 것과는 반대로, 후란사와 코티드사에 코팅된 유기합성수지 점결제가 주물사의 표면이 배수에 유리하도록 형성된 것을 의미한다. 후란사와 코티드사의 경우 뒷채움재의 2차 타설 후 기존의 뒷채움재에 작용하는 토압의 증가가 생형사에 비해 크게 나타났다. 2차 타설 후 약 1일정도면 대부분의 토압이 상당히 경감됨을 보여주고 있으나, 옹벽의 하단에 작용하는 토압은 생형사가 가장 작게 측정되었다. 코티드사의 전체적인 경향은 생형사와 같으며, 1차타설 부분의 토압경감 효과는 비슷하지만 2차타설로 인한 기존 1차타설 부분의 토압증가 현상은 약간 크게 나타난다. 그 이후의 토압은 비교적 잘 감소하며, 생형사와 후란사 혼합물의 중간 정도의 특성을 보이는 것으로 판단된다.

4.2.4 실험결과를 이용한 내부마찰각의 비교

그림 11은 실내삼축압축시험과 인위적 변위제어 및 자유변위제어 모형실험결과를 이용하여 결정한 각 혼합재료의 양생시간에 따른 후란사 혼합물의 내부마찰각의 변화를 보여준다. 모형실험결과에서 얻어진 토압계수를 이용하여 Jacky의 정지토압계수 및 Rankine의 주동토압계수를 결정하는 공식에 대입하여 역으로 내부마찰각을 산정한 것이다. 인위적변위제어 모형옹벽 실험결과에서 볼 수 있듯이, 토압이 재료의 타설후 약 하루정도면 상당부분 감소되어 정지토압계수나 주동토압계수로부터 역산하는 것이 무의미한 것으로 판단되어 1일치 자료만을 이용하여

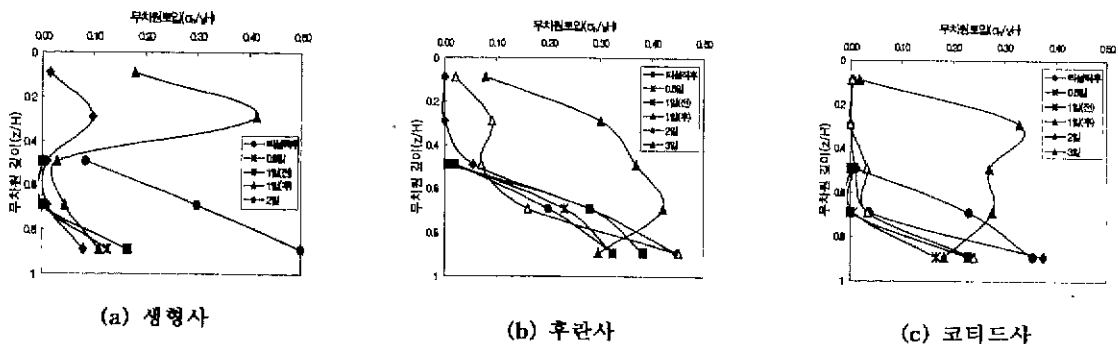


그림 10. 옹벽의 깊이별 토압의 변화

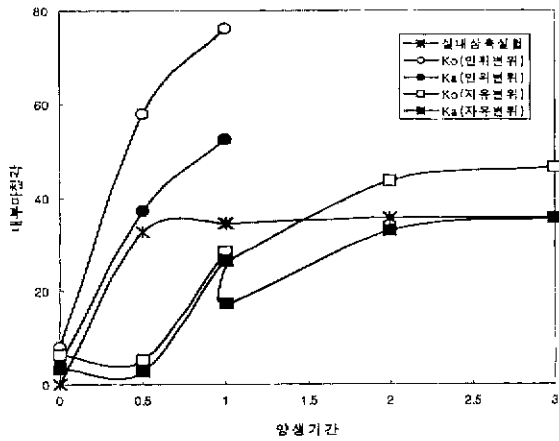


그림 11. 실험방법에 따른 내부마찰각의 비교 (후란사)

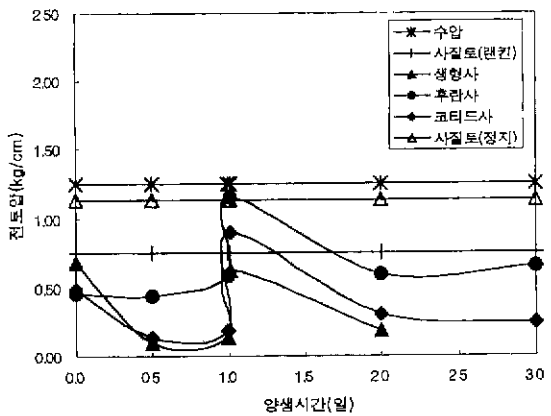


그림 12. 양생시간에 따른 전수평토압의 비교

내부마찰각을 산정하였다. 그러나, 정지토압계수나 주동 토압계수를 이용하여 내부마찰각을 산정 할 경우 토압계 수 자체가 매우 작아져 내부마찰각이 90도까지도 산정이 될 수 있으므로 주의가 필요하다. 이는 토압계수로부터 내 부마찰각의 역산이 다소 의미가 떨어지는 것으로 판단된다. 이에 반해 자유변위제어 방식의 경우 비교적 삼축시험 결과와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 기존에 수 행된 인위적 변위제어방식을 이용한 모형옹벽실험으로 부터 제안된 각종 지반공학특성치 산정에 상당한 주의 가 필요할 것으로 판단된다.

4.2.5 양생 시간에 따른 전도압

모형실험에서 측정된 수평방향 전도압을 정수압 및 내 부마찰각이 30도인 사질토의 전수평토압과 비교하여 그 립 12에 나타내었다. 자유변위 제어실험에서는 2차 타설 시에 시료의 전수평토압은 증가하는 경향을 보였다. 후란

사 혼합물의 전수평토압 증가가 가장 크게 나타났고, 비교 대상인 사질토의 정지토압과 거의 비슷한 값을 보였다. 그러나, 약 10~15시간 이후에는 랜킨토압 정도의 값으로 경 감되었다. 생형사의 전도압은 뒷채움 전 과정동안 수압 및 사질토의 랜킨토압보다 작은 값을 보였고, 코티드사는 생 형사와 후란사의 중간 정도의 값을 보였다.

5. 실험결과를 이용한 옹벽의 안정성 해석

5.1 지반 및 해석단면의 조건

폐주물사-플라이애쉬 모르타르는 배합 후 유동성이 커, 겔(Gel)과 같은 형태를 띤다. 최초에는 다른 옹벽설계에서 와 같이 유효응력개념의 토압이 아니라, 이 겔(Gel) 상태 의 모르타르는 물과 같이 수평토압계수가 1.0에 가깝게 된 다. 따라서, 이는 옹벽 뒷채움시 1회 타설량에 한계를 가져 오며 타설높이를 정하여 타설하게 되는 단계별 뒷채움이 필요하게 된다. 옹벽상단으로 갈수록 타설되는 뒷채움재 는 옹벽의 전도를 일으키는 모멘트로서 점점 크게 작용하 게 되므로, 타설높이가 점점 작아지게 됨을 예상할 수 있 다. 안정성 해석에 이용된 옹벽의 형식은 그림 13과 같은 역 T형 철근콘크리트 옹벽이며, 계산상의 편의를 위하여 단면을 단순화하였다. 주변지반조건은 점착력(c)은 $1t/m^2$, 내부마찰각은 32° 인 풍화토 지반이며 지반과 옹벽 저판

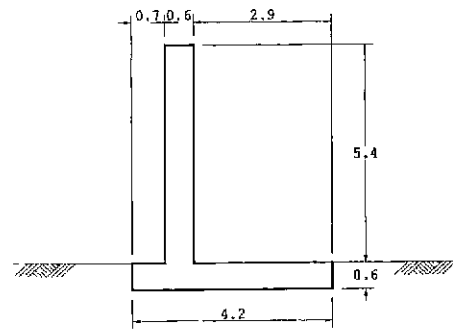


그림 13. 해석용 옹벽(부벽식, 단위:m)

표 4. 흙과 콘크리트의 마찰저항값(1958 AREA)

흙	μ
실트질이 없는 굵은 사질토	0.55
실트질이 있는 굵은 사질토	0.45
실트	0.35
표면이 거칠은 암반	0.60

표 5. 양생에 따른 단위중량 변화 (t/m³)

양생기간(일)	생형사	후란사	코티드사
타설직후	1.783	1.889	1.831
1	1.921	1.933	1.956
2	1.869	1.892	1.898
3	1.798	1.877	1.858
5	1.777	1.856	1.784
7	1.715	1.795	1.707
10	1.657	1.609	1.680
15	1.574	1.695	1.652
28	1.503	1.682	1.640

과의 마찰계수 μ 는 표 4로부터 0.45로 정하였다 (AREA, 1958). 실제 최종타설높이는 옹벽의 실제높이 6m에서 저판의 두께 0.6m를 뺀 5.4m이며, 단위폭(1m)을 적용하여

해석하였다.

5.2 뒷채움재 시공법의 결정

본 연구에서는 안정성 검토라는 측면에서 접근하여 계산을 하였으며, 옹벽자체의 구조적 안정은 고려하지 않았다. 안정성 검토시 고려해야 하는 점은 옹벽의 활동, 전도, 지지력, 지반의 원호 파괴 등이다. 유동성 뒷채움재의 초기 단위중량은 표 5에 나타난 것과 같이, 흙과 비슷하지만 양생시간이 경과함에 따라 단위중량은 점차 작아진다. 그러므로 본 연구에서는 옹벽바닥지면이 충분한 지지력을 가지며, 주변지반이 비교적 안정적이고 충분한 지지력을 가진다는 가정 하에 해석을 실시하여, 활동과 전도에 대한 안정성을 검토하였다. 활동에 대한 안전율은 2, 전도는 1.5로 정하였다.

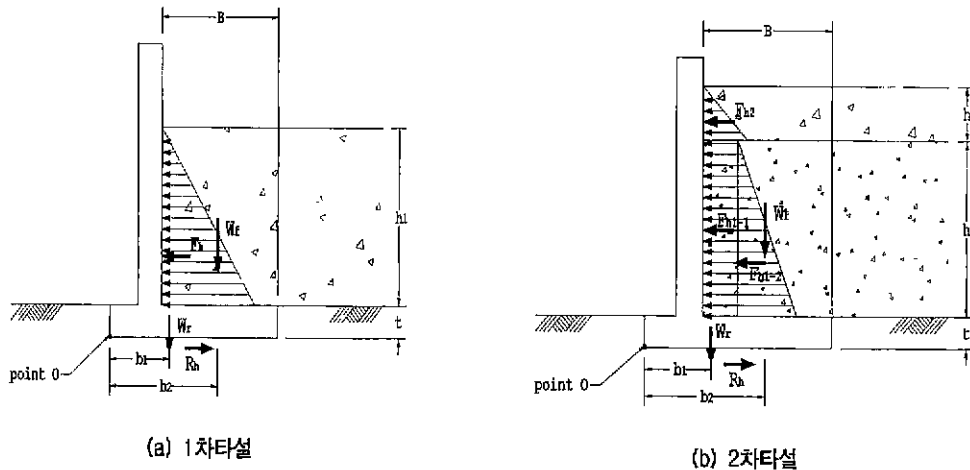


그림 14. 타설높이를 결정하기 위한 작용력

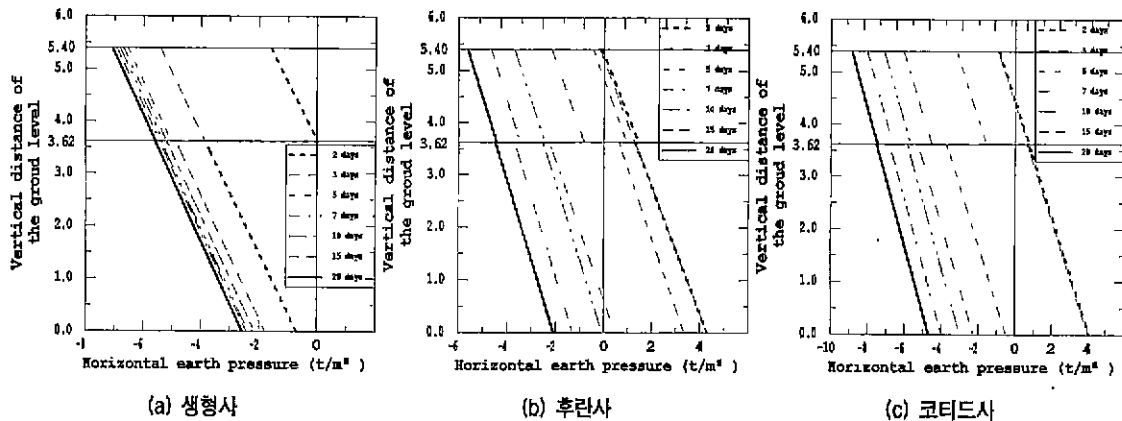


그림 15. 수평토압의 변화 (삼축실험결과 이용시)

표 6. 단계별 시공시 타설가능높이 (삼축압축실험결과)

	생형사	후란사	코티드사
1차 타설	3.62	3.62	3.62
2차 타설	2.85	2.17	2.48
총 타설가능 높이	6.47 > 5.4*	5.79 > 5.4	6.10 > 5.4

6m 해석용 옹벽의 실제 뒷채움에 가능한 높이

5.3 실내삼축실험 결과를 이용한 타설높이 결정

그림 14 (a)와 (b) 같은 단면에서 활동과 전단에 대한 안정성을 만족하도록 h_1 및 h_2 를 결정하였다. 전도모멘트로 작용하는 힘은 뒷채움재의 수평압력이며, 지지모멘트로 작용하는 힘은 옹벽의 자중 및 뒷채움재의 자중으로, 여기서 옹벽의 단위하중은 $2.5t/m^3$ 으로 이용하였다. 뒷채움재의 단위중량은 초기 배합비로 혼합할 경우 표 5에서 보는 바와 같이 $1.783 \sim 1.831 t/m^3$ 의 값을 가지나, 본 뒷채움재가 유동성을 가지도록 하기 위해 물의 양이 많아 시료의 분리가 어느 정도 발생하며 1일 양생 후에는 단위 중량이 약 $2t/m^3$ 까지 증가하는 경향을 보였다. 따라서, 본 해석 시에는 뒷채움재의 단위 중량을 $2t/m^3$ 로 보았다. 2차 타설 높이를 산정함에 있어 1차 타설 높이 산정시보다 한가지 더 고려하여야 할 점은 1차 타설된 뒷채움재가 지지할 수 있는냐 하는 지지력 문제이다. 그러나, 1차 타설된 뒷채움재가 지지하지 못한다고 해서 파괴되는 것이 아니라 옹벽에 의해 구속을 받는 상태에서 경화되고 있는 과정이므로 이는 크게 옹벽의 안정성에 영향을 미치지 못하는 것이라, 오히려 1차 타설된 뒷채움재가 경화되면서 발생된 취약부분이 보강된다는 점에서 바람직하게 볼 수 있다. 따라서 2차 타설 시 1차 타설된 뒷채움재의 지지력 문제는 고려하지 않았으며, 시공기간의 단축을 감안하여 1일 양생 후 타설하는 것으로 가정하여 안정성 검토를 하였다. 전도와 활동을 고려한 계산결과를 표 6에 나타내었고, 1차 및 2차타설이 가능한 총 높이가 실제 옹벽의 뒷채움재 타설높이 5.4m를 초과하므로 6m 높이의 옹벽을 2일 동안 2번의 타설로 시공이 가능함을 알 수 있다.

여기서,

F_h : 옹벽배면에 작용하는 수평토압 (t)

W_r : 옹벽 자중 (t)

W_f : 옹벽에 상재되는 뒷채움재의 하중 (t)

K_{r1} : 1차타설 뒷채움재의 토압계수

h_1 : 1차타설 뒷채움재의 높이 (m)

h_2 : 2차타설 뒷채움재의 높이 (m)

표 7. 해석에 이용된 수평토압계수

	생형사	후란사	코티드사	혼합사
K_{r1}	0.043	0.050	0.026	0.062
K_{r2}	0.950	0.865	0.953	0.918

t : 옹벽저판의 두께 (m)

b_1 : O점에서 옹벽 자중과의 수평거리

b_2 : O점에서 뒷채움재 자중과의 수평거리

B : 옹벽에 상재하는 뒷채움재의 폭 (m)

5.4 모형실험에 의한 타설높이 결정

혼합물의 물성실험 결과에 의한 해석시, 유동성 뒷채움재를 배합하여 타설한 직후의 수평토압계수를 폐주물사의 종류와 무관하게 모두 1.0을 사용하였지만, 모형옹벽 실험의 경우 각각 생형사, 후란사, 코티드사 그리고 혼합사의 자유변위제어실험에서 측정된 토압계수를 사용하여 타설높이를 결정한다.

실내실험결과로부터 얻어진 물성치를 사용한 타설높이 결정시 1차 타설부분의 토압은 Jaky공식을 사용하였고, 2차 타설 부분은 토압계수 1을 사용하였지만, 모형옹벽 실험에서는 최초 2일간 직접 계측된 값을 사용한다. 계산시 사용되는 토압계수는 1차와 2차타설의 경우, 각각 1일 양생후 및 타설 직후 계측값을 사용한다. 토압계수는 모형벽체의 높이에 따라 조금의 차이는 있지만 평균값을 사용하며, 표 7과 같다.

모형실험결과를 이용한 단계별 뒷채움재 타설 가능 높이는 표 8에 나타내었다. 모형실험에 의해 결정된 1차타설 높이가 3.9m는 실내실험에 의한 높이 3.62m와 거의 일치하고 있다. 이러한 결과는 옹벽에 변위를 가하기 전인 타설 초기의 상황을 나타내는 해석이므로 실험의 방법적인 문제와는 관계가 없다. 대체적으로 모형실험에 의한 2차타설 높이는 크게 나타나며, 이것은 모형실험에서 알 수 있듯이 재료의 타설 후 약 하루 정도면 토압의 대부분이 감소되

표 8. 단계별 시공시 타설높이 (모형옹벽실험결과)

	생형사	후란사	코티드사	혼합사
1차타설 (m)	3.90	4.07	3.86	3.90
2차타설 (m)	3.57	3.64	3.54	3.44
합계 (m)	7.47 > 5.4	7.71 > 5.4	7.40 > 5.4	7.34 > 5.4

는 빠른 토압경감 효과에 의한 것이다. 유동성 뒷채움재를 모형옹벽토조에 타설했을 때, 토조의 윗부분과 아랫부분을 통해 상당량의 물이 배수되고, 또한 자중에 의한 압밀현상 또는 침강현상으로 인해 토압이 빨리 감소되는 것으로 판단된다.

5.5 양생 기간에 따른 안정성 평가

5.5.1 뒷채움재의 강도정수에 의한 해석

일반성토재와는 달리 본 뒷채움재는 방치 기간(양생 기간)에 따라 강도가 증가하므로 전도, 활동에 대한 옹벽의 안정성이 커지게 된다. 충분한 양생 기간 후에는 옹벽과 일체가 되어 하나의 강체로 볼 수도 있게 되며, 이는 뒷채움재의 배면에서 작용할 수도 있는 토압을 막는 측면에서 고려될 수 있으므로 설계 상에 큰 이점으로 작용할 수 있다. 옹벽에서 전도 및 활동을 일으키는 수평토압의 변화를 이용하여 해석을 수행하였다. 수평토압계수는 실내실험에서 구한 내부마찰각을 사용하여 최대한 안전측이 되도록 하였고, 삼축실험결과로부터 결정된 점착력을 이용하였다. 옹벽이 충분한 강성을 가지며, 옹벽배면이 경사지지 않았다는 가정 하에 Rankine 토압을 적용하여 산정하였

다. 그 결과는 그림 15 (a), (b), (c)에 나타내었다. 생형사의 경우 양생 2일 후, 즉 2차 타설부분의 양생기간이 1일인 경우에 이미 점착력이 발휘되어 옹벽에 수평토압이 거의 작용하지 않음을 알 수 있다. 정지토압계수를 사용하고, 뒷채움재의 내부 마찰각을 최소로 잡았음에도 이러한 결과를 보여주고 있으므로 장기적으로 볼 때 옹벽에 작용하는 외력은 뒷채움재 배면에 작용하는 수평토압만이 존재함을 알 수 있다. 후란사의 경우에는 양생 초기에 점착력이 거의 발휘되지 않고, 오직 내부 마찰각에 의한 강도만이 존재할 뿐이므로, 양생 2일 후에도 옹벽 전면에 걸쳐 수평토압이 작용함을 알 수 있다. 다른 폐주물사에 비해 점착력의 발휘가 늦으므로, 7일 후에야 뒷채움재의 점착력이 발휘되어 옹벽전면에 걸쳐 토압이 거의 발생하지 않음을 볼 수 있다. 코티드사의 경우는 양생 3일 후에도 옹벽의 상단부분만이 토압이 작용하지 않을 뿐 거의 전면에 토압이 작용하고 있으며, 점착력의 발휘 또한 생형사에 비해 늦어 5일 후에야 옹벽에 토압이 걸리지 않음을 알 수 있다.

5.5.2 인위적변위제어 모형실험결과에 의한 옹벽의 안정성 해석

인위적변위실험에 의하여 1일 경과 후에 토압의 변화

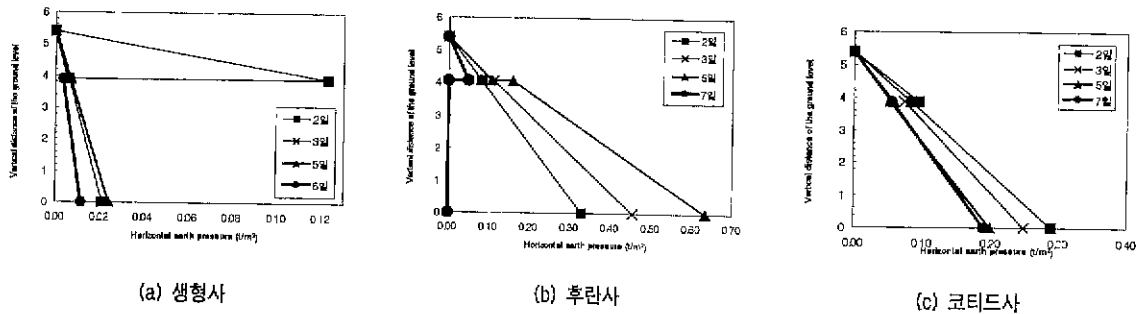


그림 16. 수평토압의 변화 (인위적 변위제어 실험)

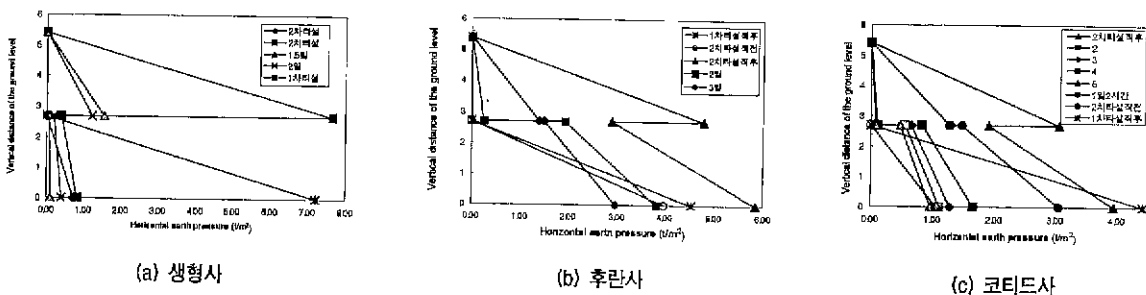


그림 17. 수평토압의 변화(자유변위제어실험)

에 따른 옹벽의 안정성을 검토하여 1차타설 높이를 결정할 수 있었으며, 또한 2차타설에 의해 뒷채움을 완성할 수 있다. 그림 16 (a), (b), (c)에 나타난 것과 같이 타설 후 2일 경과시의 토압은 후란사가 가장 크며, 혼합사, 코티드사, 생형사의 순으로 나타난다. 생형사의 경우 2일후에는 기존 타설부분인 옹벽저부의 토압은 1일이 지난 상부토압의 약 20%로 줄어든다. 생형사에 포함된 벤토나이트의 수분을 흡착하는 성질로 인하여, 배합시 유동성을 확보하기 위한 물의 양이 상대적으로 많으며, 플라이애쉬의 양이 적으므로, 단위중량은 작고 점착력이 가장 많이 발휘됨으로서 토압경감 효과가 빠르게 된다. 후란사의 경우 장기적으로 볼 때 양생기간에 따라 옹벽의 안정성은 커지며, 옹벽에 작용하는 외력은 뒷채움재 배면에 작용하는 토압 만이 남게 된다. 코티드사의 경우 초기 타설 직후에는 빠르게 토압이 감소되지만, 그 이후 토압의 변화가 비교적 적게 발생한다.

5.5.3 자유변위 제어실험 결과에 의한 옹벽의 안정성 해석

자유변위 제어실험의 주요 측정치는 뒷채움재의 타설로 인해 발생하는 자연적인 변위와 토압으로, 특히 2차 타설에 의해 1일 양생된 기존의 1차 타설 뒷채움에 미치는 영향을 평가하는 것으로, 즉 상하로 배수되는 물에 의해 모형 벽체 하부의 1차타설뒷채움이 포화됨으로서 발생하는 영향, 또한 상재하중으로서의 벽체하부에 작용하는 토압, 그리고 2차타설로 인하여 추가적으로 발생하는 모형옹벽 상하부의 변위와 이러한 원인 등으로 발생하는 옹벽바닥의 기존 1차타설뒷채움에 발생하는 응력집중 현상을 판단할 수 있게된다. 결국 이러한 영향으로 인하여 시간이 경과하면서 토압이 어떻게 경감되는가를 분석한다. 옹벽의 단계별 뒷채움시공 안정성 해석시에 자유변위실험은 현장에서의 뒷채움재 타설로 인한 옹벽의 토압 및 변위관계를 잘 재현할 수 있다. 모형옹벽의 자유변위 실험시 2회로 나누어 뒷채움을 실시하였으며, 1차타설 후 24시간 양생하여 2차 타설을 하였다. 실험결과는 그림 17 (a), (b), (c)에 나타내었다.

생형사는 초기 1차 타설시에 벽저부의 토압이 약 $7t/m^2$ 으로 다른 폐주물사 혼합물보다 크다. 그러나 1일 후(2차 타설 직전) 벽체 바닥의 토압이 약 $1t/m^2$ 으로 줄어들어 가장 큰 토압 경감효과를 보여준다. 이것은 상대적으로 다른 재료보다 점착력이 1일이내에 빠르게 발현되는 것이 그

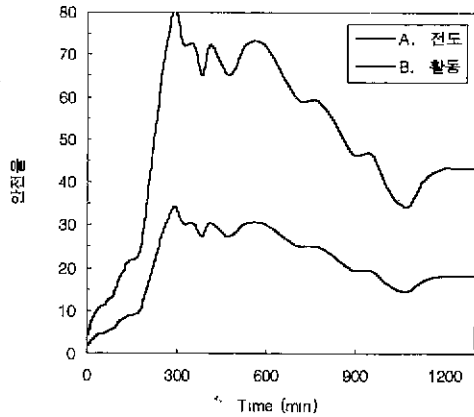
원인이다. 2차타설 직후 벽체 중간지점의 토압은 약 $7t/m^2$ 이 되었지만, 기존 1차 타설 부분에는 크게 영향을 주지는 않는다. 그리고 이미 경화되면서 점착력이 발현되고 있으므로 거의 자립하고 있다. 이러한 이유로 인하여 2차 타설 뒷채움은 1일 양생기간이 지난 하부의 1차타설 뒷채움에 상재하중으로만 작용한다. 실내실험의 해석 결과시 강도정수인 점착력에 의해 벽상부 토압이 음의 값이 되지만 모형실험에서는 0이 되었다. 그림 15 (a)와 비교해 보면 1차와 2차타설 높이가 조금 다르지만 1일과 2일 경과시의 벽하부의 토압이 약 $0\sim 1t/m^2$ 사이의 값을 보이며 거의 비슷하게 나타난다.

후란사의 경우 1차 타설시 벽저부의 토압은 코티드사와 비슷한 $4.5t/m^2$ 이다. 1일이 경과한 후의 토압은 코티드사와 생형사와는 달리 별로 줄어들지 않는다. 후란사 혼합재는 초기 타설시에 재료의 분리와 급격한 배수로 인해 약 2시간동안 뒷채움재가 수축하며 토압은 줄어든다. 이때 사질토와 입경이 비슷한 후란사는 침강이 빨리 발생하며, 이로 인하여 옹벽 바닥의 단위중량은 커지며 벽체저부의 토압은 상대적으로 커진다. 이후 양생되면서 생형사보다 상대적으로 많이 포함된 플라이애쉬와 시멘트의 포졸란 효과에 의해 미세하지만 조금씩 팽창하는 특성이 있으며, 이로 인하여 토압은 크게 줄어들지는 않는 것으로 판단된다. 2차 타설 직후 옹벽저부의 토압은 벽체의 변위 발생에도 불구하고 오히려 초기 타설 값보다 더욱 증가하는 경향이 있고, 2일 후부터의 토압분포는 코티드사 혼합물과 비슷한 경향을 나타내었다. 또한, 양생시간에 따른 벽체상부의 토압은 크게 감소하였으나, 하부에서의 감소효과는 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 앞절에서 강도정수에 의해 해석한 그림 15와 비교하여 모형실험에서 2차타설 직후의 벽하부의 토압이 커지는 것은 이러한 이유 때문이다. 그러나 2단계 타설에 의한 전체적인 옹벽의 안정성에는 크게 문제가 되지 않음을 다음절의 안전율 변화에서 알 수가 있다.

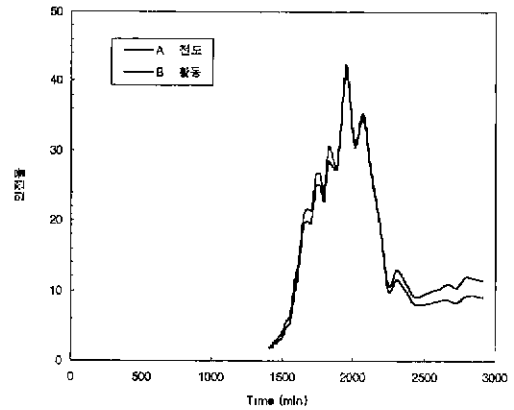
코티드사의 경우 생형사 혼합물과 후란사 혼합물 결과의 중간 정도에 해당하는 특성을 보여주었다.

5.6 뒷채움 종료후의 안전율의 변화

모형실험 결과를 이용하여 뒷채움재 타설후의 안전율을 평가해본 결과, 시간에 따른 안전율의 변화는 생형사 혼합물이 가장 크게 나타났고, 코티드사, 후란사의 순이다. 모든 뒷채움 재료가 공히 활동보다는 전도에 대한 안정성



(a) 1차타설후



(b) 2차타설후

그림 18. 옹벽의 안정성 해석 결과 (생형사, 자유변위실험)

이 크게 나타난다. 생형사의 경우 1차타설 후 안전율은 크게 증가한다. 이것은 점착력이 빠르게 증가되는 것이 그 원인으로 판단되며, 그 이후 벽체의 변위가 정지되면서 안전율은 작아지며, 일정해진다. 후란사는 안전율이 가장 작으며, 시간에 따른 안전율의 변화는 생형사와 유사하다. 코티드사의 경우 안전율이 거의 일정한 값을 유지한다. 2차 타설시의 시간에 따른 안전율은 1차 타설과 마찬가지로 후란사가 가장 작으며, 코티드사, 생형사의 순이다. 생형사는 그림 18(a)와 (b)에 나타난 것과 같이 침투 형태를 보이며, 이후 시간 경과에 따라 일정해진다. 후란사와 코티드사 모두 2차타설후의 안전율은 일정하게 안정된 값을 보인다. 대체적으로 안전율은 만족할 만큼 안정한 값이며, 비교적 큰 안전율의 결과가 나타난다.

6. 결론

본 연구는 산업 폐기물인 플라이애쉬 및 폐주물사의 배합설계를 완성하여, 옹벽 뒷채움재로 사용하기 위한 적용성 평가를 위해 모형옹벽실험을 통해 양생시간에 따른 토압경감 효과를 확인하였다. 또한 현장 적용성을 검증하기 위해 6m 표준옹벽을 채택하여 실내실험 및 모형실험결과를 이용한 전도 및 활동에 대한 안전성을 검토하였고, 이를 근거로 현장에서의 뒷채움재 타설방법을 제시하였다. 폐주물사를 이용한 유동성 뒷채움재를 이용한 모형옹벽실험으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 인위적 변위제어 실험방법의 적용시 모형옹벽에 유동성 뒷채움재의 타설후 약 6시간이 지나면 옹벽구조물

에 작용하는 토압이 약 80% 감소하였다. 또한, 실험결과를 이용한 안정성 해석으로부터 6m 옹벽에 타설할 수 있는 뒷채움재의 1차 타설높이 및 2차 타설높이는 생형사의 경우 3.9m 및 3.57m, 후란사의 경우 4.07m 및 3.64m, 코티드사의 경우 3.86m 및 3.54m, 혼합사의 경우 3.9m 및 3.44m로 결정되었고, 실제 옹벽의 뒷채움높이 5.4m보다 크므로 2단계 시공으로 옹벽의 뒷채움을 완공할 수 있다.

(2) 인위적 변위제어실험의 경우 유동성 뒷채움의 타설 직후 토압계수의 크기는 0.8 ~ 1사이의 값으로 나타나며 기존의 뒷채움재로 사용되는 흙보다 크다는 것을 알 수 있다. 모든 재료의 경우 타설 후 약 12시간이 경과하면 옹벽에 작용하는 토압이 상당부분 저감되는 것을 알 수 있다. 따라서, 초기의 안정성이 확보되면 장기적인 옹벽의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

(3) 모형실험의 결과로부터 얻어진 토압계수로부터 Jaky의 정지토압계수 및 Rankine의 주동토압계수를 이용하여 역으로 내부마찰각을 산출하였다. 인위적 변위에 의한 실험시 타설후 약 하루정도면 토압이 상당부분 감소되어 역산으로 내부마찰각을 구하는 것은 다소 의미가 약해질 수 있다. 그러나 옹벽의 자유변위 실험결과를 이용할 경우 비교적 실내삼축실험 결과와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 기존의 수행되는 인위적 변위제어 실험으로부터 결정된 각종 지반공학특성치 산정시 상당한 주의가 필요한 것으로 판단된다.

(4) 자유변위방식을 이용한 실험결과 후란사와 코티드사의 경우 모형옹벽의 위아래로 배수가 되기 때문에 토압경감 효과가 빨리 나타났다. 그러나, 1일후의 토압이

같은 양생시간의 생형사에 비해 크게 유지되었다. 생형사의 경우 표면에 코팅된 벤토나이트에 의해 수분흡수효과가 커져 타설 초기에 토압 감소 효과는 후란사 및 코티드사 보다는 작게 나타났다. 그러나, 시간이 지나면서 양생효과와 벤토나이트 성분의 점착력이 크게 발휘되어 1일정도면 토압이 80% 이상 경감되었다.

- (5) 2단계 타설방법을 적용한 자유변위실험의 2차타설로 인한 1차타설 뒷채움재에 작용하는 토압의 크기는 사용된 폐주물사의 종류에 따라 크게 다른 양상을 보였다. 생형사의 경우 1차타설한 뒷채움재의 점착력과 양생으로 인한 강도가 발휘되어 2차타설로 인한 기존의 뒷채움재에 토압의 증가가 거의 없었다. 후란사의 경우 1차타설 후 2차타설한 뒷채움재에 의해 기존의 뒷채움재에 전이되는 토압의 증가가 크게 나타났고, 전이된 토압이 시간에 따라 감소는 하지만, 다른 재료에 비해 상대적으로 작은 감소효과를 보였다. 코티드사는 생형사와 후란사의 중간 정도의 경향을 보였다. 본 연구에 이용된 재료의 특성을 흙과 비교해 보면, 후란사의 경우 모래질 흙, 생형사의 경우 점성토, 코티드사의 경우 실트질 흙과 비슷한 경향을 보이는 것으로 판단된다.
- (6) 자유변위제어 모형실험결과에 의한 높이 6m 옹벽의 안정성 해석시, 생형사는 타설초기에 토압이 가장 크지만, 1일후 가장 큰 토압 경감효과를 보여준다. 이것은 다른 재료보다 상대적으로 점착력이 빠르게 발휘되는 것이 그 원인이다. 2차타설 직후 기존 1차타설부분에는 크게 영향을 주지는 않으며, 이미 경화되면서 점착력이 발휘되고 있으므로 거의 자립하고 있다. 후란사의 경우는 1차 타설초기 점착력의 발휘는 생형사에 비해 약 5%정도 밖에 안되고, 또한 2차타설시에 일시적인 응력 집중으로 인해 벽저부의 토압은 증가하는 경향이 있다. 그러나 2차 뒷채움의 토압이 빠르게 감소되어 토압 분포가 2차타설 직후와는 반전이 되지만, 2차타설시의 안전을 해석에 의하면 양생기간이 경과함에 따라 옹벽의 안정성은 증가함을 알 수가 있었다. 코티드사 혼합물은 1일 경과시 토압이 빠르게 감소하지만, 기존 뒷채움인 1차타설 부분이 2차타설에 의해 영향을 많이 받는다. 2차 타설 후 약 2시간이 경과하면서 후란사와 유사하게 토압이 빠르게 감소되어 토압 분포가 2차타설 직후와는 반전이 되지만, 3일 이후 토압은 많이 감소되어 옹벽저부의 토압은 후란사의 1/3에 불과하며, 특히 2차타설 부분의 토압은 거의 영의 값이 되었다.

참고문헌

1. 윤여준 (1999), "Engineering Properties of Fly Ash - WFS Mixed Materials for Use as a Flowable Materials", 고려대학교 석사학위 논문
2. 이관호, 이인모, 조재윤, 윤여준(1999), "유동성 뒷채움재로 사용하기 위한 플라이애쉬- 폐주물사 혼합재료의 특성 연구", 한국지반공학회 1999년도 정기 학술발표회, pp. 489-496
3. 조재윤 (2000), "폐주물사 혼합재를 이용한 유동성 뒷채움재의 지반 공학적 적용성 연구", 고려대학교 박사학위 논문, pp. 179.
4. Abichou, T., Benson, C., and Edil, T. (1998). "Beneficial Reuse of Foundry Sands in Construction of Hydraulic Barrier Layers", Environmental Geotechnics Report 98-2, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison.
5. Ali, N., Chan, J. S., Simms, S., Bushman, R., and Bergan, A. T. (1996). "Mechanics Evaluation of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 8, No. 1, February, pp. 19~25
6. AREA (American Railway Engineering Association; 1958), "Retaining Walls and Abutments", American Railway Engineering Association Manual, Vol. 1., Chicago
7. 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.
8. Head, K. H (1982). Manual of soil laboratory testing, Pentech Press
9. Hameinik, J. D., and Frantz, G. C. (1991), "Strength of Concrete Containing Municipal Solid Waste Fly Ash", ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 5, September-October, pp. 508~517
10. 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
11. Janardhanam, R., Burns, F., and Peindl, R. D. (1992), "Mix Design for Flowable Fly-Ash Backfill Material", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 4, No. 3, August, pp. 252~263
12. Javed, S. (1994). "Use of Waste Foundry Sand in Highway Construction", Ph. D. thesis School of Civ. Engrg., Purdue University, May, pp. 273
13. Lee, K., Yoon, Y., Cho, J., Rodrigo, S., and Lee, I. (2000), "Engineering Properties of Mixture of Fly Ash and Waste Foundry Sand", J. of Solid Waste Technology and Management, USA, (논문심사중)
14. Naik, T. R., Patel, V. M., Parikh, D. M., and Tharaniyil M. P. (1994), "Utilization of used sand in concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 6, No. 2, May, pp. 254~263
15. 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
16. Nantung, T. E. (1993), "Design Criteria for Controlled Low Strength Materials". Ph. D. Thesis, School of Civil Engrg., Purdue University, Aug., pp. 344
17. Xu, A., and Sarkar, S. L. (1994), "Microstructural development in high-volume fly-ash cement system", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 6, No. 1, February, pp. 117~136

(접수일자 1999. 5. 13)