

모형옹벽실험을 이용한 폐주물사 혼합재의 지반공학 적용성 연구 A Study on the WFS Co-mixtures by Small Scale Retaining Wall Test

조재윤¹⁾, Jae-Yun, Jo, 이관호²⁾, Kwan-Ho Lee, 이인모³⁾, In-Mo Lee

¹⁾ 동의 공업대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg, Dongui Univ.

²⁾ 경성대학교 건설환경공학부 조교수, Assitant Professor, Dept. of Civil Engrg., Kyungsung Univ.

³⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Korea Univ.

SYNOPSIS : The purpose of this study is to present the application of WFS co-mixtures for retaining wall as flowable backfill. The fly ash, generated at the Tae-An thermoelectric power plant, was used in this research and was classified as Class F. Green Sand, Furane Sand, and Coated Sand, which had been used at a foundry located in Pusan, were used. Couple of laboratory tests and small scale retaining wall tests were performed to obtain the physical properties of the WFS co-mixtures and the possibility of backfill materials of retaining wall. The range of permeability for all the co-mixtures was from 3.0×10^{-3} cm/s to 6.0×10^{-5} cm/s. The unconfined strength of the 28-day cured specimens reached around 550kPa. Results of the consolidated-undrained triaxial test showed that the internal friction angle is between 33.5° and 41.8° . The lateral earth pressure against wall decreased up to 80% of initial pressure within a 12 hours and the total lateral earth pressure is less than that of typical granular soil. It was enough to construct the backfill for the standard retaining of 6m with just two steps, like fill the co-mixtures for half of retaining wall, and then fill the others after 1 day. The stability of retaining wall for overturning and sliding increased as the curing time elapsed.

Key words : flowable backfill, lateral earth pressure, WFS(waste foundry sand) co-mixtures

1. 서론

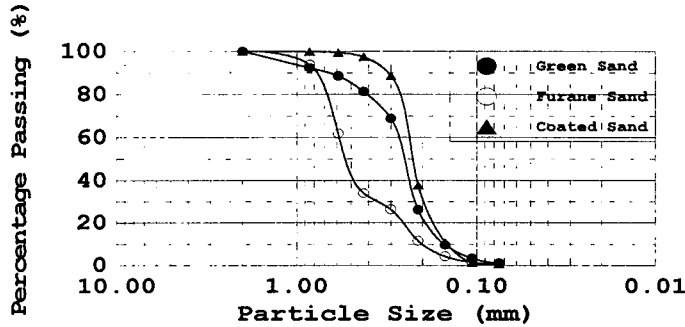
국내의 주물업체는 약 1000여개 이상으로 전국적인 분포로 산재하고 있다(이무강, 1998). 우리나라에서는 그 동안 폐주물사 발생과 처리 경로에 따른 환경유해성여부 및 발생량 저감대책, 자원절약 및 재활용 등에 대한 구체적인 연구 조사가 거의 없었으므로 실제적인 유해성 여부가 검증되지 않았으며, 폐주물사의 처리방법이나 처리시의 지원대책이 마련되지 않아 시멘트제품 생산 시 모래대체용의 전량 매립에 의존하고 기타 불법투기가 성행되고 있다. 이와 같이 문제가 되고 있는 폐주물사를 단지 폐기물로서 처분할 경우, 자원의 손실일 뿐만 아니라 폐기처분에 드는 비용에 의해 주물업체의 애로 가중으로 경쟁력 저하와 환경훼손 또한 매립장 부족을 유발하고 있다. 주물단지의 주물공장들은 주물공정의 부산물인 폐주물사(Waste Foundry Sand, WFS)의 처리시 주물사의 초기 구입비와 비슷한 부산물 처리 비용을 지출하고 있고, 이로 인해 제품의 경쟁력이 저하되고 있는 실정이므로, 이의 적절한 처리 및 재활용 방법의 개발이 시급하다.

기존의 뒷채움재는 다짐을 통해 적절한 밀도 및 강도를 얻는데 반해, 본 연구에 이용된 시료는 시공 초기에는 유동특성을 보이고, 시간에 따라 강도가 발현되는 CLSM 특성을 지반공학 구조물에 적용하는 것이다. CLSM의 뒷채움재 적용시 다짐이 필요하지 않고, 따라서 옹벽 시공시 다짐으로 인해 발생하는 토압 문제등을 해결할 수 있다. 이에 본 연구에서는 폐주물사를 옹벽 뒷채움재로 사용하기 위한 적절한 배합비 및 이에 대한 기본물성치를 제시하고, 모형옹벽실험을 통해 유동성 뒷채움재의 지반공학적 적용성을 제시하고자 한다.

2. 시험시료 및 시료배합비 결정

2.1 시험시료

본 연구에서 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, Coated Sand는 무기물질이 점결제로서 사용된 주물사이다. 각 폐주물사 종류에 따른 입도분포는 [그림 1]에 나타내었다.



[그림 1] 각 폐주물사의 입도분포

비중시험결과와 각 폐주물사의 비중은 생형사는 2.377, 후란사는 2.459, 그리고 코티드사는 2.424로 나타났다. 폐주물사의 XRF(X-ray Refraction) 결과는 [표 1]과 같다. [표 1]을 보면, 원재료가 모래인 만큼 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃가 90%이상 차지함을 볼 수 있으며, 특히 코티드사의 경우 폐물 수지 등으로 코팅되어 있으므로, 시험 준비중에 손실되는 양이 상대적으로 많음을 알 수 있다. 사용된 플라이애쉬는 태안화력발전소에서 발생한 것이며, 시멘트에 혼합하기 위해 정제하기 바로 전 단계의 것으로 그 화학적 조성은 [표 1]과 같다. 본 플라이애쉬는 Class F에 해당하며, 비중은 2.17이다. 시멘트는 KSL 5201에서 규정한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다 (윤여준, 1999).

[표 1] 플라이애쉬 및 각 폐주물사의 화학적 조성

	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
후란사	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

※ L.O.I. : Loss On Ignition

2.2 시료의 배합방법

본 연구의 실험을 위한 시료의 배합비는 흐름시험(flow test)과 일축압축시험결과를 이용하여 결정되며, 시험 전체에 걸쳐 폐주물사는 1일 노건조한 후 사용하여 폐주물사의 함수비의 차이로 인한 시험오차를 줄이도록 하였다. Nantung(1993)이 제안한 흐름시험방법을 이용하였다. $\phi 7.6\text{cm} \times 15.2\text{cm}$ (3in \times 6in)의 한쪽이 개방된 실린더에 시료를 그 표면이 편평하도록 완전히 채운 후, 표면이 매끄러운 유리판에 위에 부어, 퍼진 재료의 지름이 20~30cm를 만족하는 배합비를 결정하였다. 부은 시료의 퍼진 정도는 시공 초기에 시료가 자기수평능력(Self-Leveling) 및 적절한 유동성을 갖게 하는 중요한 특성치이다. 옹벽 뒷채움재의 일축압축강도는 500~700 kPa 정도가 일반적이며, Janardhanam(1992), Naik(1997)의 경우 690 kPa, 일본의 Hakucho Ohashi Project의 시행 중에 발표된 Horiuchi(1992), Kawasaki(1992)의 연구에서는 200 kPa로 시료의 목표강도를 잡았다. 본 연구에서는 시료의 목표강도를 550kPa으로 정하여, 시멘트양이 되도록 적게 포함되도록 하여, 비용이 적게 들도록 하였다.

3. 실내시험

3.1 투수시험

사용한 장비는 Trautwein Soil Testing Equipment사의 제어 패널(Control Panel)과 Flexible-Wall Permeameter를 사용하였다. 본 투수시험은 변수두 시험(Falling Head Test)으로 실시하였다. 확장공화

토나 실트 입경의 일반 흙과 비슷한 $(1.092 \sim 2.192) \times 10^{-5}$ cm/sec의 투수계수를 가지는 시료를 이용한 투수계수 시험시 가할 수 있는 동수경사는 ASTM(1993) 시방서 기준에 따라 최대 5를 이용하였고, 이에 대한 추가 수두로서 입수측에 4kPa의 압력을 가하였다.

실험결과 투수계수는 약 10^{-5} cm였다. 생형사와 코티드사에 비해 후란사가 근소한 차이지만 투수계수가 큼을 볼 수 있는데, 후란사는 입자가 다른 폐주물사에 비해 크고 뭉쳐져 있어 배합 시 공극이 많이 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 생형사는 입자가 작고 생형사에 섞여 있는 벤토나이트의 영향으로 비교적 적은 범위의 투수계수를 나타냄을 볼 수 있다.

3.2 일축압축시험

사용장비는 일본 Marui사에서 생산된 Unconfined Compression Apparatus를 사용하였다. Head(1982)가 제안한, 지름 5cm인 시료에 대하여 일반적인 압축속도는 2mm/min, 즉 분당 1.6%정도의 변형율로 압축시험을 수행하였다. 시료의 최대압축응력은 최초설정 값인 550kPa 정도였으며, 점결제로서 벤토나이트가 섞인 생형사 시료가 가장 단시간 내에 자립이 가능하였으며, 시멘트의 배합량이 가장 적고 입자가 큰 후란사 시료가 초기 강도가 가장 늦게 발현되었다.

3.3 삼축압축시험 방법

본 시험에 사용된 장비는 C. K. Chan 등(1981, 1990)에 의해 개발된 자동 삼축압축시험기(The Automated Triaxial Testing System; C.K.C Type)를 사용하였다. 재하율은 풍화잔적토에서 시행하는 재하율인 0.2%/min으로 압축을 실시하였다. 압밀비배수시험(CU test)을 실시하였으며, 시료포화 후 전단을 시행하였다. 양생기간에 따른 내부마찰각의 증가는 후란사 시료만이 뚜렷이 증가하는 경향을 보이거나 생형사나 코티드사에 비해 그리 큰 증가를 보이지는 않았음을 보여 주고 있으며, 전단 시 시료가 파괴되면서 Dilation의 영향이 전단면에 미치지 않음을 보여주고 있다. 또한, 모든 시료가 15일 이후에 일정한 값으로 수렴하므로 수치 해석 시 필요한 강도정수는 이 값들을 사용함이 옳을 것으로 판단된다. 내부 마찰각과는 달리 점착력은 적은 범위에서 증가함을 보이고 있으며, 생형사 시료의 경우 점착력은 2일 이후부터 크게 증가하여 28일 강도의 70%이상을 보이며, 5일 이후에는 거의 증가하지 않는다. 후란사시료와 코티드사 시료의 경우에는 10일 이후에도 34.6%, 27.5%정도의 점착력이 증가함을 보였다.

4. 모형옹벽실험

4.1 모형토조 및 모형벽체

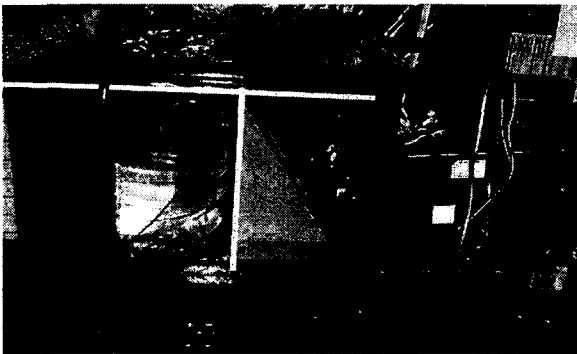
모형 실험에 사용된 실제 모형토조의 사진은 [그림 2]와 같으며, 토조는 100cm x 52cm x 50cm(가로x세로x높이)의 크기를 가진다. 측벽의 한쪽은 아크릴판(t=50mm)으로 되어 있으며, 실험시 폐주물사와 벽체의 거동, 그리고 각 계측장치를 볼 수 있게 하였다. 다른 측벽과 저면은 실험시 변형이 발생하지 않도록 강판으로 제작하고 채널형강으로 보강하였다. 실험시 시료와의 마찰을 제거하기 위해 토조의 측벽에 윤활제를 뿌리고 비닐을 씌웠다. 토조의 바닥은 미끄러짐을 방지하기 위해 에폭시를 바르고 표준사를 뿌려 편편하게 하였다. 뒷채움 양생 후의 수분 흡수시 시료의 팽창에 의한 토압을 측정한다. 이때 수압을 배제하고 순수한 팽창에 의한 토압만을 측정하기 위해 토조 바닥에 직경 6cm의 다공질판 6개를 설치하고 바닥에 진공탱크를 연결하였다.



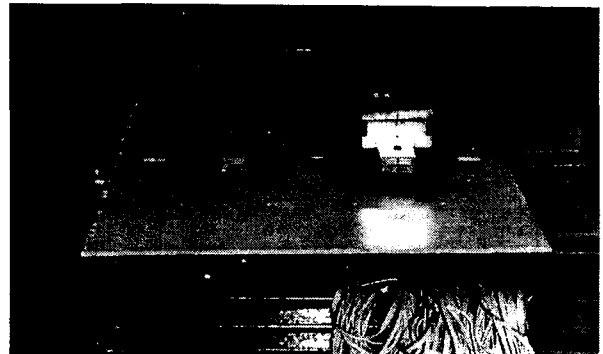
[그림 2] 모형옹벽실험장치

본 실험에 사용된 모형벽체의 크기는 50cm×52cm(높이×폭)이다. 재질은 강판(t=7mm)이며, 채널형 강으로 보강하였다. 그리고 모형 벽체에 로드셀 및 하중전달판을 부착할 수 있도록 하였다. 위치는 벽체중앙에서 깊

이 방향으로 부착하였다. 벽체와 하중전달판 측면과의 간섭 및 시료가 유입되는 것을 방지하기 위하여 하중 전달판과 벽체에 가로 및 세로 방향으로 1mm의 틈을 만들었고, 모형벽체의 면과 하중전달판의 면이 일치하도록 하였다. 또한 모형 벽체의 상하부 변위를 일으킬 수 있도록 저판과 벽체를 연결하였다. 모형벽체에 작용하는 수평토압을 측정하기 위해 벽체 전면에 10cm간격으로 5개의 로드셀을 토조측면의 영향을 최소화하기 위해 벽체 중앙에서 깊이 방향으로 설치하였다. 로드셀을 모형벽체에 설치한 후 하중전달판을 로드셀에 설치하였다. 하중전달판 설치시 판과 벽체와의 간섭이 발생하지 않도록 하기 위하여 판과 벽체 사이에 아크릴판을 설치한 후 판을 로드셀에 고정시킨다. 로드셀을 완전히 고정한 후 아크릴판을 제거하였다. 실험조건을 단순화하기 위해 벽면마찰의 영향을 최소화할 수 있도록 벽체 표면을 매끈하게 하였다. 뒤택음 후 발생하는 벽체의 상부 및 하부 변위를 측정하기 위하여 벽체의 상, 하단에 각각 2개의 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 2개의 포텐스미터를 설치하였다. [그림 3]과 [그림 4]는 수압 및 단계하중을 이용한 로드셀검증 과정을 보여준다.



[그림 3] 정수압을 이용한 로드셀 검정과정



[그림 4] 단계별 하중에 의한 로드셀 검정

4.2 실험방법

본 연구에서는 두 가지의 실험방법을 이용하여 모형옹벽에 작용하는 토압의 측정 및 해석을 수행하였다. 1차실험으로 인위적변위제어실험을 이용하였다. 이는 기존의 모형실험에서 인위적변위제어방식의 실험을 수행하였기에 본 연구에서도 1차실험은 기존의 수행된 모형실험방법과 유사하게 수행하였다. 이 실험은 옹벽에 작용하는 토압의 크기를 지속적으로 측정하면서 일정한 크기의 토압이 옹벽에 작용하면 인위적으로 약간의 변위를 주어 옹벽에 작용하는 토압의 크기를 조절하였다. 즉 시간에 따라 옹벽의 뒤택음재가 주동방향의 변위를 일으키도록 인위적인 변위제어를 하였다. 이 실험의 주목적은 옹벽의 뒤택음재를 단 한번에 타설하여 옹벽에 작용하는 토압의 크기를 측정하고, 또한 본 연구에 이용된 재료의 특성 중 양생으로 인한 강도증진과 토압감감효과를 확인하는 것이다. 인위적 변위실험결과를 이용하여 옹벽의 안정성해석, 즉 전도와 슬라이딩에 대한 안정성 검토를 수행하였고, 이 결과를 근거로 각 단계별 타설 높이를 결정하였다. 즉, 1일 경과 후에 2차타설로서 뒤택음을 완성할 수 있는가를 알고자 하는 1차 및 2차타설 높이를 결정하는 실험이다.

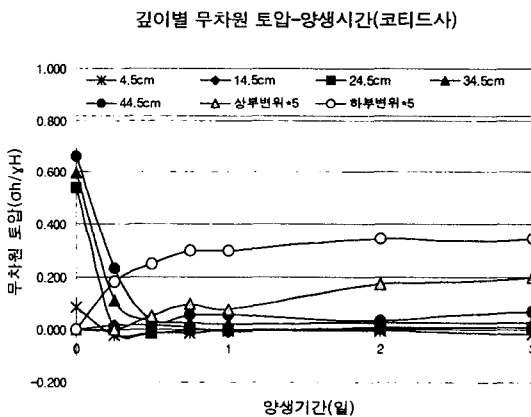
2차실험에서는 현장에서 옹벽의 시공 및 뒤택음과정을 모형실험을 이용해 재현하기 위해 1차실험과는 달리 두단계로 나누어 뒤택음재를 타설하였다. 2차 실험에서의 주된 측정치는 뒤택음재의 타설로 인해 발생하는 자연적인 변위와 토압이었다. 옹벽의 뒤택음시공 단계별 안정성 해석을 하기 위해서는, 1차 실험의 인위적변위제어 결과보다는 현장의 시공조건을 잘 반영하는 2차의 자유변위실험에 의한 해석이 현장에서의 뒤택음재 타설로 인한 옹벽의 토압 및 변위관계를 잘 표현할 수 있다. 인위적변위제어 모형실험결과 및 실내실험 물성치를 이용한 실제 옹벽의 안정성해석을 위해 높이가 6m인 부벽식 옹벽을 이용하였고, 전도와 활동에 대한 안정성 해석결과 시공단계별 타설 가능한 높이가 1차 타설시 약 3.6m이고, 2차 타설시 약 2.4m정도로 결정되었다. 이러한 실내실험결과를 이용한 계산을 근거로 2차 실험에서는 모형옹벽 높이의 절반씩 나누어 2일 동안 두단계로 나누어 뒤택음재를 타설하였다. 각 타설단계는 높이 6m인 해석용 옹벽의 전도와 슬라이딩에 대한 안정성 검토를 수행하였고, 현장 타설시에 발생 가능한 결과를 분석하였다. 이러한 이유로 두가지 실험방법이 본 연구에서 수행되었다.

4.3 인위적변위제어 실험결과

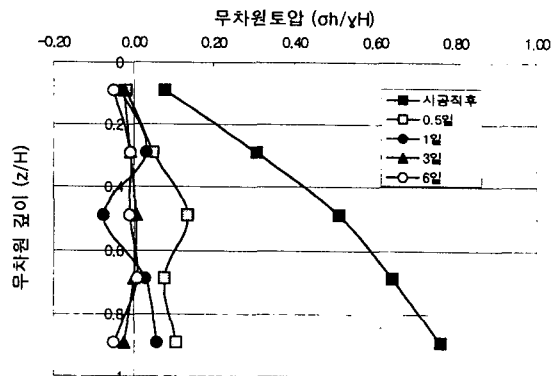
변위 및 양생에 따른 토압경감효과 : 각 폐주물사의 변위는 앞에서 설명한 실험방법에서와 같이 주로 벽체의 상부를 크게 하고 하부는 적은 값이다. 변위의 크기는 시간이 경과함에 따른 각 폐주물사 혼합재의 양생특성과 관계가 있다. 즉 각폐주물사 마다 타설 초기에 발생하는 다른 배수능력으로 인한 뒤채움의 수축정도, 그리고 점착력의 초기 발생 유무에 의한 초기 강도의 발현능력과 변형이 증가함에 따른 응력집중효과의 유무 등과 관계가 있다. 실험결과 후란사의 변위가 가장 크며, 생형사, 혼합사, 코티드사의 순서로 나타난다. 양생시간에 따라 변위의 증가와 더불어 토압은 감소하는 비슷한 형태를 나타내며, 코티드사의 경우 가장 작은 변위값을 보여준다.

깊이별 양생시간과 토압관계 : 본 연구에 사용된 유동성 뒤채움재의 중요한 지반공학적 특성치는 응벽 뒤채움재로 타설한 초기에 보이는 유동특성과 시간이 지남에 따라 강도가 발현되는 것이다. 양생시간에 따라 모형옹벽의 4.5cm, 14.5cm, 24.5cm, 34.5cm 및 44.5cm에 작용하는 토압의 해석을 단순화하기 위해 무차원토압을 이용하였다. 무차원토압은 측정된 수평토압을 바닥에서의 최대연직응력으로 나눈 값으로 정의된다. 전체적인 거동특성으로는 유동성뒤채움재의 타설후 약 6시간 정도 지나면 응벽구조물에 작용하는 토압이 80%이상 감소되는 것을 보여준다. 이러한 빠른 토압경감효과는 유동성채움재를 모형옹벽토조에 타설했을 때, 토조의 윗부분과 아랫부분을 통해 상당량의 물이 배수가 되고, 또한 자중에 의한 압밀현상 또는 침강현상으로 인해 토압경감효과 빨리 나타나는 것으로 판단된다. 토압의 경감효과는 사용된 폐주물사의 종류에 따라 약간의 시간적 차이를 보여준다. 생형사혼합물과 코티드사혼합물[그림 5]은 빠른 토압경감효과에 의해 1일 이전에 토압은 거의 일정하게 되었다. 후란사와 혼합사는 시간이 경과함에 따라 대부분 토압이 감소되지만, 벽체저부의 토압이 일시적으로 증가한다. 이것은 사질토와 유사하게 입경이 가장 큰 후란사가 타설초기 재료분리에 의한 빠른 침강으로 인하여 벽체저부에서 밀도의 증가, 그리고 응력집중 등의 원인으로 판단된다. 생형사의 경우 벤토나이트 성분을 함유하여 점성이 발휘되기 때문에 다른 재료에 비해 상대적으로 토압경감 효과가 크게 나타났다.

양생시간별 깊이와 토압관계 : [그림 6]은 생형사 혼합물의 깊이에 따른 양생시간과 무차원토압과의 관계를 보여준다. 전체적인 거동특성은 유동성뒤채움재의 타설직후 토압의 크기는 정수압의 분포보다는 약간 작은 값을 보여준다. 그러나, 기존의 응벽뒤채움재로 이용되는 흙의 사용시보다 초기에 응벽에 작용하는 토압이 크다는 것을 알 수 있다. 타설직후 발생하는 이러한 큰 토압은 결국 시공방법에도 영향을 준다. 실험에 사용된 모든 재료의 경우 유동성 뒤채움재의 타설후 약 12시간 정도 경과하면 응벽에 작용하는 토압의 상당부분이 저감되는 것을 볼 수 있다. 이는 응벽의 안정성, 즉 전도와 활동에 대한 안정성과 밀접한 관계가 있다. 결국 응벽의 안정성은 유동성 뒤채움재의 타설 높이와 타설후 경과시간에 영향을 받는 것으로 판단할 수 있고, 초기의 응벽의 안정성 문제는 단계별 시공으로 해결되며, 뒤채움재 타설후 응벽의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.



[그림 5] 깊이에 따른 양생시간과 토압관계 (코티드사)



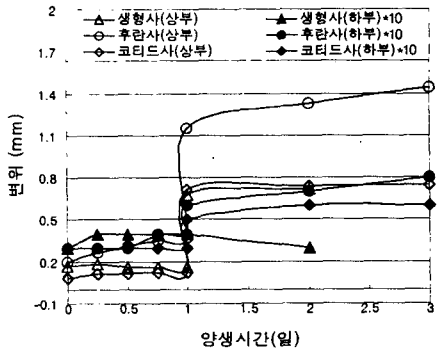
[그림 6] 양생시간에 따른 깊이 토압 관계 (생형사)

4.4 자유변위 실험결과

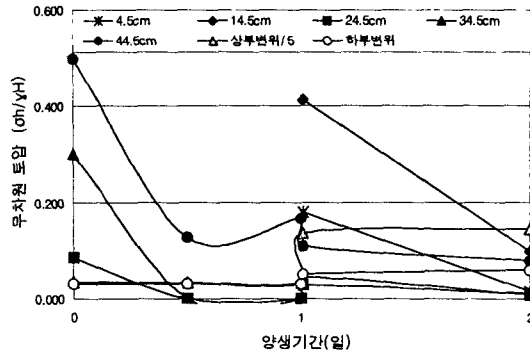
시간에 따른 자유변위 및 토압계수 : 각 폐주물사의 변위는 인위적변위에 의한 실험과는 달리 각 뒤채움재의 시료에 따라 변위의 크기는 자유로이 다르게 발생하였다. [그림 7]에 의하면, 1일 이내의 변위는 모든 시료가 거의 비슷하게 발생한다. 1일 후의 2차타설시에 모든 시료는 추가적인 변위가 발생하며, 후란사의 변위가 가장 크게 나타난다. 특히 생형사의 경우 벽체 하단의 변위는 2차타설에 관계없이 일정한 값을 보인다. 이것은 벽저부의 1일 후의 토압이 안정되게 감소하고 있다는 것을 보여준다. 양생시간에 따라 변위의 증가와 더불어 토압은 감소하는 비슷한 형태를 나타내며, 생형사의 경우 상부변위는 초기의 값을 일정하게 유지하지만, 벽하부의 변위는 초기에 약간 증가하는 경향을 보여준다. 이것은 생형사의 초기타설시 배수가 느리게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 2차타설시에 벽하부의 변위는 거의 없고 상부의 변위만 생기지만 기존 뒤채움에 추가적인 토압변화는 거의 발생하지 않으며, 역시 1차타설 부분은 1일 이내에 안정적으로 감소하게 된다. 후란사의 경우 하부토압계수가 초기에 일단 감소되었다가 증가하면서 벽상하부의 변위가 모두 조금씩 증가하는 경향을 보인다. 2차타설시에 벽의 상하부의 변위가 모두 발생하지만 상부의 변위는 더욱 크게 발생하며, 이로 인하여 벽하단의 토압은 급격하게 감소하게 되는 전형적인 폐주물사뒤채움의 단계적 뒤채움 과정을 보여준다. 코티드사에서는 초기 변위값이 일정하게 유지되며, 토압은 잘 감소하고 있음을 보여준다. 1일 후 2단계 뒤채움시에 벽상하단의 변위는 모두 발생하지만, 후란사와는 달리 기존 뒤채움의 토압이 증가한다. 이것은 후란사에 비해 상대적으로 벽상부의 변위가 적게 발생하며, 2차뒤채움이 상재하중으로 작용하는 것이 그 원인이다.

깊이별 양생시간과 토압관계 : 자유변위실험은 뒤채움재의 타설후 자연적으로 증감되는 변위를 이용하여 해석하였다. 또한, 자유변위제어방식의 경우 뒤채움재의 타설을 2회에 나누어 하루의 시간차를 두고 수행하였고, 타설높이는 모형옹벽 높이의 절반으로 나누어 각각 타설하였다. 뒤채움재의 타설을 2단계로 나누어서 수행하는 이유는 실내실험결과와 1차 모형옹벽실험의 결과, 본 연구에서 해석하려는 높이 6m 옹벽의 1차타설 가능한 높이가 약 66%로 결정되었기 때문에 한번에 타설하는 1차 모형실험과는 달리 2차 모형실험에서는 2단계에 걸쳐 타설하는 현장의 조건을 재현하여 그 결과를 분석하기 위해서이다. 이것은 또한, 앞절의 인위적변위제어방식은 현장의 시공과정을 반영하지 못한 것에 비해, 자유변위제어방식은 현장의 옹벽뒤채움 시공과정을 비교적 잘 재현하는 장점이 있음을 의미한다.

[그림 8]은 생형사 혼합물을 이용한 단계별 뒤채움 시공시 깊이에 따른 양생시간과 토압과의 관계를 보여준다. 초기 타설시에 토압이 가장 크게 나타난다. 초기 생형사혼합물은 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 뒤채움재의 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 일정해진다. 이것은 2차타설에 의한 벽체 상하부에 추가적인 변위가 발생하는 것이 그 원인이 된다. 그러나 1일이 지난 생형사는 이미 경화되면서 점착력이 빠르게 발휘되고 있으므로 거의 자립하고 있다는 것이 주된 이유이다. 이는 생형사의 표면이 벤토나이트로 코팅이 되어 있어 물의 흡착능력이 다른 시료에 비해 더 큰 재료적인 특성으로 인해 다른 혼합물보다 비교적 점착력이 크게 발생하는 것으로 판단된다. 후란사와 코티드사의 경우 2차 타설에 의한 영향이 생형사와 비슷하지만, 각각 24.5cm, 34.5cm위치에서 토압증가는 상대적으로 크다. 하지만 시간이 경과하면서 토압은 급격하게 감소하는 경향을 보여준다. 벽저부인 44.5cm 위치에서는 코티드사와 후란사혼합물뒤채움의 토압이 감소된 후에 증가하는 경향을 보여주는데 이것은 응력집중으로 판단된다. 대체적으로 토압감소는 잘 이루어지며, 시간이 경과함에 따라, 후란사보다는 코티드사혼합물의 토압경감효과가 약간 빠르게 나타난다.

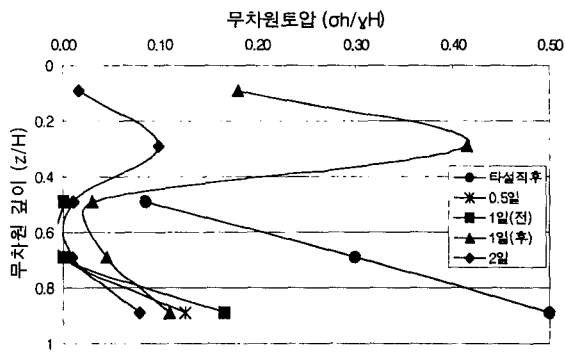


[그림 7] 시료별 양생시간에 따른 자유변위

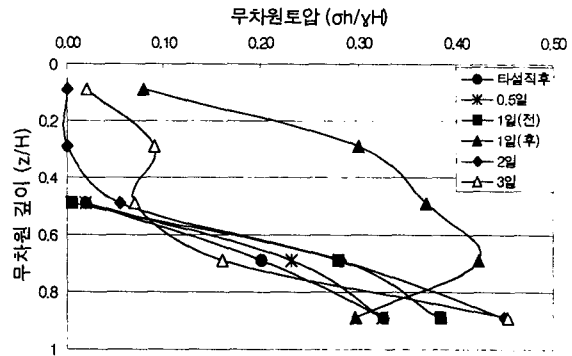


[그림 8] 깊이 에 따른 양생시간과 토압관계

양생시간에 따른 깊이별 토압분포도 : [그림 10], [그림 11]은 생형사와 후란사를 이용한 단계별 뒤펀시공시 양생시간에 따른 깊이별 토압을 보여준다. 타설직후 토압은 깊이에 따라 마치 수압과 같은 형태로 작용하였고, 다음 단계 타설전까지 토압의 감소효과가 큼을 알 수 있다. 또한 그림에서 2차 뒤펀시공재 타설 직전과 직후의 토압의 변화를 보면 2차 타설로 인해 상부에 가해지는 토압은 수압과 같은 형태지만, 기존의 타설부분에서의 토압의 증가 효과는 상당히 작은 것으로 나타나며, 특히 생형사의 경우는 S 커브처럼 보인다. 이는 기존의 타설된 뒤펀시공재의 시멘트 및 플라이애쉬에 의한 포졸란반응에 의해 상당히 경화된 것으로 볼 수 있다. 생형사의 경우 주물사에 코팅된 벤토나이트 성분에 의해 약간의 점착력이 발휘된 것으로 판단된다. 생형사의 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 뒤펀시공재의 2차 타설후 기존의 뒤펀시공재에 작용하는 토압의 증가가 생형사에 비해 크게 나타났다. 2차타설 후 약 1일정도면 대부분의 토압이 상당히 경감됨을 보여주고 있으나, 옹벽의 하단에 작용하는 토압은 생형사가 가장 작게 측정되었다. 후란사의 경우 1차타설시 양생초기에 점착력이 거의 발휘되지 않고 오직 내부 마찰각에 의한 강도발현이 이루어지므로 초기 토압 감소의 속도는 느리며, 2차타설에 의한 토압증가의 효과도 가장 크다. 그러나 벽상부의 2차타설 뒤펀시공재는 타설초기 가장 빠른 배수효과에 의해 토압이 잘 감소되지만, 역시 벽저부에 있는 44.5cm 위치의 로드셀에는 응력집중 현상이 나타난다. 코티드사의 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 후란사혼합물의 중간 정도의 특성을 보이는 것으로 판단된다.



[그림 10] 깊이별 토압 (생형사)



[그림 11] 깊이별 토압분포 (후란사)

5. 결론

- (1) 투수시험 결과, 4×10^{-5} cm/s 정도로 나타났으며, 이는 $1.0 \sim 1 \times 10^{-3}$ cm/s 정도의 투수계수를 갖는 모래와 1×10^{-6} cm/s 정도의 투수계수를 갖는 점토의 중간 정도이고, 550kPa 정도의 일축압축강도를 보였다. CIU 삼축시험 결과, 28일 양생시료의 내부마찰각은 33.5° 에서 41.8° 정도의 값을 보였다.
- (2) 인위적변위제어 실험방법을 적용시 모형옹벽에 유동성 뒤채움재의 타설후 약 6시간이 지나면 옹벽구조물에 작용하는 토압이 약 80% 감소하였다. 또한, 실험결과를 이용한 안정성 해석으로부터 6m 옹벽의 뒤채움재의 시공은 2단계 시공으로 충분하고, 또한, 재료의 양생특성을 고려할 때, 1차타설후 약 1일경과후 2차타설이 가능한 것으로 안정성 해석결과 나타났다.
- (3) 자유변위방식을 이용한 실험결과 후란사와 코티드사의 경우 슬러리 형태의 유동성 채움재를 모형옹벽에 타설하면, 타설초기에 자중에 의한 압밀 또는 침강현상이 비교적 생형사에 비해 크게 발생하였고, 이로 인한 재료분리, 즉 폐주물사혼합물과 물의 분리가 생형사보다 빠르게 진행되고, 분리된 물이 모형옹벽의 위아래로 배수가 되기 때문에 토압경감 효과가 빨리 나타났다. 그러나, 1일후의 토압이 같은 양생시간의 생형사에 비해 크게 유지되었다. 생형사의 경우 표면에 코팅된 벤토나이트에 의해 시간이 경과함에 따라 점착력이 증가되지만 초기에는 그 크기가 작다. 또한 벤토나이트의 수분흡수효과가 커서 타설초기에 토압감소 효과는 후란사 및 코티드사 보다는 작게 나타났다. 그러나, 시간이 지나면서 양생효과와 벤토나이트성분의 점착력이 크게 발휘되어 1일정도면 토압이 80% 이상 경감되었다.
- (4) 2단계 타설방법을 적용한 자유변위실험의 2차타설로 인한 1차타설 뒤채움재에 작용하는 토압의 크기는 사용된 폐주물사의 종류에 따라 크게 다른 양상을 보였다. 생형사의 경우 1차타설한 채움재의 점착력과 양생으로 인한 강도가 발현되어 2차타설로 인한 기존의 채움재에 토압의 증가가 거의 없었다. 후란사의 경우 1차타설후 2차타설한 채움재에 의해 기존의 채움재에 전이되는 토압의 증가가 크게 나타났고, 전이된 토압이 시간에 따라 감소하기는 하였지만, 다른 재료에 비해 상대적으로 작은 감소효과를 보였다. 코티드사는 생형사와 후란사의 중간 정도의 경향을 보였다. 본 연구에 이용된 재료의 특성을 흙의 특성과 비교해 보면, 후란사의 경우 모래질 흙, 생형사의 경우 점성토, 코티드사의 경우 실트질 흙과 비슷한 경향을 보이는 것으로 판단된다.

참고문헌

- 윤여준 (1999), "유동성 옹벽뒤채움재로 사용하기 위한 플라이애쉬-폐주물사 혼합재료의 특성연구", 석사 학위 논문, 고려대학교, pp. 86
- 이무강 (1998), "폐주물사를 이용한 방식재 제조기술개발", 산업자원부 연구보고서, pp. 119
- ASTM (1993), *Soil and Rock*
- Head, K. H (1982), *Manual of soil laboratory testing*, Pentech Press
- 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
- 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
- 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
- Nantung, T. E.(1993), "Design Criteria for Controlled Low Strength Materials", Ph. D. Thesis, School of Civil Engrg., Purdue University, Aug., pp 344