

방식사를 이용한 유동성 채움재의 최적배합설계 및 다짐특성

A Study for Optimum Mix-Design and Compaction of CLSM Using WFS

이 관 호*, 조 재 윤**, 신 현 무***, 김 남 호****

Lee, Kwan Ho · Cho, Jae Yun · Shin, Hyun Moo · Kim, Nam Ho

1. 서 론

산업활동이 활발히 진행됨에 따라 산업폐기물의 발생은 전세계적으로 가히 천문학적인 숫자로 증가하고 있는 실정이다. 그래서 최근에는 이러한 산업폐기물의 재활용에 관한 연구가 곳곳에서 활발히 진행되고 있다. 1997년 한국자원재생공사는 산업폐기물로 분류되는 플라이애쉬가 석탄을 연료로 사용하는 화력발전소로부터 연간 약 3,445,000 톤이 발생되고 있다고 발표하였다. 그러나 이중 단지 15%만이 콘크리트 혼화재와 시멘트 원료, 벽돌, 기와 제조 등의 제한된 부분에서만 사용되고 있다. 그 나머지는 대부분 발전소에 인접한 매립부지를 조성하여 물과 혼합하여 매립하고 있는 실정이다. 또한, 주물공장의 부산물인 폐주물사(WFS : Waste Foundry Sand)는 국외에서는 잔골재의 대용으로 연구가 활발했으나, 국내에서는 그 양이 크게 문제시되지 않아 그간 재활용 연구대상에서 제외되어 왔고, 여러 해 동안의 누적량이 상당하여 이제는 방치할 수 없는 단계에 이르렀다.

본 연구에서는 폐주물사, 방식사 및 플라이애쉬의 토목건설재료로의 활용 방안 중에서 국내에는 비교적 생소한 개념인 유동성 뒤채움재 (CLSM, Controlled Low Strength Materials)로의 활용 가능성 평가를 위해 최적 배합 설계법 및 다짐특성에 대한 규명을 하고자한다.

2. 실험재료의 기본물성시험

2.1 플라이애쉬 및 시멘트

본 연구에 사용된 플라이애쉬는 태안 화력발전소에서 발생한 것이다. 사용된 플라이애쉬는 시멘트에 혼합하기 위해 정제하기 바로 전 단계의 것으로, 그 화학적 조성은 표 1과 같으며, SiO₂가 약 60%,

* 정희원, 경성대학교 건설환경공학부 조교수, 051-620-4756(email : khlee@ks.ac.kr)

** 정희원, 동의공업대학 토목과 교수, 051-860-3116 (email : c jy@dit.ac.kr)

*** 경성대학교 건설환경공학부 조교수

**** 정희원, 한국기술대학 건축공학과 조교수



Al₂O₃가 25%로 주성분을 이루고 있다. ASTM 분류로는 본 플라이애쉬는 Class F에 해당하며, 비중은 2.170이었다. 시멘트는 KSL5201에서 규정한 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

표 1. 플라이애쉬의 XRF-성분분석결과

성분	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.
%	60.33	24.78	3.82	1.06	0.01	2.39	0.84	0.86	0.59	0.50	4.84

2.2 폐주물사 및 일반모래

본 연구에서 사용된 폐주물사의 종류는 생형사(Green Sand), 후란사(Furane Sand)로서, 생형사는 벤토나이트로 코팅된 것이고, 후란사는 유기적으로 고결된 모래이다. 방식사는 폐주물사를 화학약품 처리하여 주로 주철관 지하매설물 뒷채움재로 이용되고 있는 것을 사용하였다. 이들과의 비교를 위해 바다모래와 강모래를 이용하였다. 비중시험결과 생형사는 2.377, 후란사는 2.459, 방식사는 2.684, 강모래는 2.665, 바다모래는 2.652정도를 보여주고 있다. 각각의 입도분포는 그림 1과 같다.

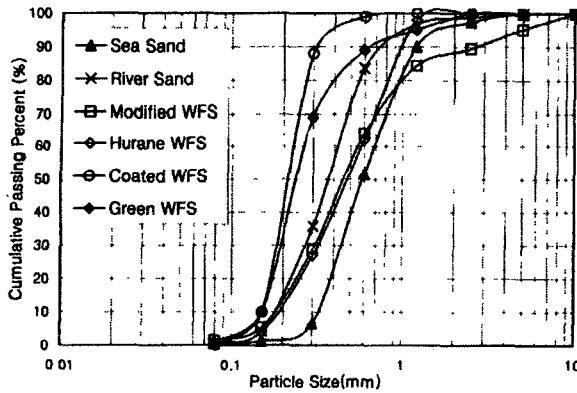


그림 1. 폐주물사 및 모래의 입도

3. 최적배합비 결정법

3.1 유동성 채움재의 특징

유동성 채움재는 기존에 사용되고 있는 각종 흙을 이용한 채움재를 대신할 수 있는 새로운 개념의 채움재이다. 단위중량은 일반 흙과 비슷하지만, 타설 직후와 달리 28일 양생 후의 값이 약간 감소하는



재료로서, 경량성토재는 아니다. 유동성 채움재는 저장도 콘크리트 개념을 채움재에 적용한 것으로, controlled low strength material (CLSM), lean mix backfill, controlled density fill, flowable mortar 등의 이름으로 이용된다. 이러한 이름 중에서 유동성 채움재(flowable fill)가 가장 많이 이용된다. 미국의 콘크리트 협회(ACI, The American Concrete Institute)의 시방서에는 CLSM을 다음과 같이 정의하고 있다. 자체 점착성을 가지는 재료로서 초기에는 흐름특성이 중요한 요소이고, 시간에 따라 양생되면서 강도가 증가하여, 28일 양생후의 압축강도가 8.3 MPa 보다 작은 재료를 의미한다. CLSM은 구조부재로서 이용하기보다는 주로 하중을 지지하지 않는 채움재로서의 이용이 보편적이다.

유동성 채움재로서의 이용 시 고려하여야 하는 특성이 시공성과 재굴착의 용이성이다. 채움재의 재료특성상 초기 유동성을 가지고 시간에 따라 강도가 발현된다는 것은, 기존의 채움재 시공시 소요의 강도를 얻기 위해 다짐이 필요한데, 유동성 채움재의 이용시 이러한 다짐과정을 생략할 수 있고, 또한 부적절한 다짐으로 인해 발생하는 문제를 원천적으로 제어할 수 있다. 시공된 채움재를 재굴착하기 위해서 재령 28일 재료의 일축압축강도를 약 1035 kPa로 제한하고 있다. 이는 인력 또는 기존의 백호우로 쉽게 재 굴착이 가능하도록 하기 위한 것으로, 굴착을 위해 다른 추가적인 장비의 사용을 배제하기 위해서이다. 본 연구에서는 지하매설물 채움재로서 강도가 너무 적으면 도로기층 또는 보조기층으로 불안정하므로 시료의 목표강도를 1000kPa로 결정하였다.

3.2 흐름특성시험

유동성 채움재의 유동특성을 결정하기 위해 한면이 뚫린 7.6cm×15.2cm (3in×6in) 실린더를 이용하였고 (ACI, 1994), Nantung (1993)이 제안한 30.4cm×30.5cm(12in×12in)의 매끄러운 표면을 가진 유리판을 이용하였다.

3.3 최적 배합비 산정

그림 2에 나타난 흐름곡선상의 점들은 같은 유동성을 가지는 점들이다. 흐름곡선에서 D점과 같이 최소물소요량 (PMWD, Point of Minimum Water Demand)을 결정하는 것이다. 이는 모래와 플라이애쉬 혼합물이 적절한 유동특성을 가지기 위해 필요한 최소의 물소요량을 의미한다. 즉, 이는 혼합물이 양생이라는 과정을 거쳐 강도를 얻으므로, 양생되면서 혼합물 속의 물은 시료 밖으로 빠져나오고, 이로 인해 공극이 생기는데, 이러한 공극을 가장 작게 만드는 물의 양을 의미한다. 또한 최소물소요량은 혼합재료의 재료분리를 최소화하고, 비교적 균일한 재료를 만드는데 중요한 역할을 한다.

흐름시험 곡선으로부터 k_1 , k_2 , k_3 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

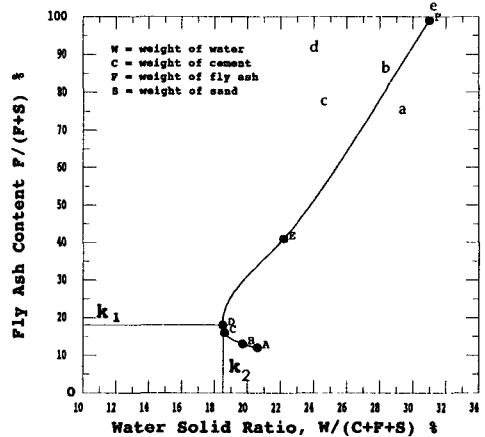


그림 2. 최소물소요량 결정법



$$k_1 = \frac{F}{(F+S)} \quad k_2 = \frac{W}{(C+F+S)} \quad k_3 = \frac{W}{C}$$

여기서, F = 플라이애쉬 사용량 (kg/m³), S = 모래사용량, W = 물사용량, C = 시멘트사용량
 일축압축시험과 흐름시험결과를 이용하여 물-시멘트비와 혼합재료의 일축압축강도와의 관계를 얻을 수 있다. 일축압축강도 1000kPa에 해당하는 물-시멘트비를 결정하였다. 표 2는 최적배합설계시 플라이 애쉬, 시멘트 및 모래의 사용비율을 보여준다.

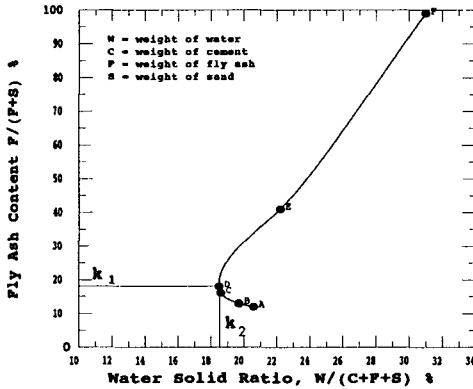


그림 2. PMWD 결정

표 2. 최적배합비

종류	생형사	후란사	방식사	강모래	바다
재	8.1	17.1	29.8	20.8	21.6
모래	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

4. 다짐특성

본 연구에 적용된 유동성 채움재(CLSM)은 다짐이 필요없는 재료특성을 가진다. 따라서, 기존의 뒷 채움재에 적용시 필수요소인 다짐과정을 생략할 수 있으므로 시공의 단순화 및 뒷채움재의 균일한 품질관리를 할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에 이용된 시료의 다짐특성은 주로 CBR(California Bearing Ratio)을 이용하여 평가하였다. 그림 3은 생형사 혼합물의 지지력과 관입량과의 상관관계를 보여준다. 1일 양생된 시료의 경우, 지지력이 28일 양생시료의 약 30%정도로 나타났다. 이는 유동성 채움재의 초기 강도발현 특성이 비교적 잘 나타난 것으로 판단된다. 양생시간에 따른 후란사, 방식사, 강모래 및 바다모래를 이용한 유동성 채움재의 지지력 경향도 생형사를 이용한 유동성 채움재의 특성과 비슷한 경향을 나타내었다. 그림 4는 각각의 혼합물의 28일 양생시 지지력과 관입량과의 관계를 보여준다. 4mm 이하의 초기관입량의 경우 시료의 종류에 따른 차이가 거의 없으나, 관입량이 많아짐에 따라, 즉 지지력의 한계치에 이르게 되는 경우 바다모래 혼합물이 가장 큰 지지력 값을 보여주었고, 생형사 혼합물이 가장 작은 값을 보여주었다. 이는 바다모래의 경우 입자의 모양이 매우 불규칙하여 입자와 입자의 상호간에 맞물림 현상이 크게 나타났고, 생형사 혼합물의 경우 표면에 코팅된 벤토 나이트 성분 때문에 사용된 시멘트의 효과가 저감된 것으로 판단된다. 28일 양생된 각각의 시료의 CBR 값의 범위가 10-15 정도로 측정되었고, 이는 도로의 안정처리된 보조기층 또는 기층재의 CBR 기준값의 약 30-50% 정도의 범위에 속한다. 본 연구에서는 주로 옹벽의 뒤채움용으로 이용하고자 하므로, 앞에서 제시된 소요의 강도(1000kPa)를 만족하고, 특히, 유동특성으로 인한 시공법의 단순화가 가



능할 것이다. 이 부분은 기존의 뒤채움재 시공법과 유동성 채움재의 현장시공을 통해 검증할 예정이다.

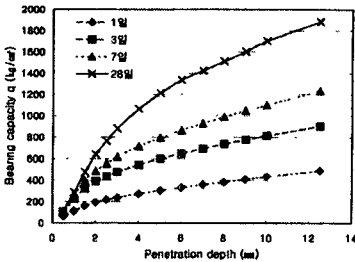


그림 3. 생형사 혼합물의 CBR

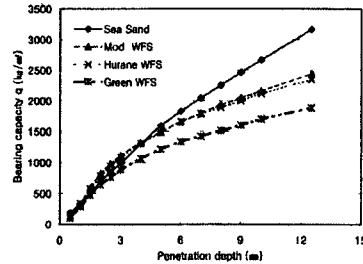


그림 4. 28일 양생시료의 지지력

5. 결 론

비중시험결과 각 폐주물사의 비중은 생형사는 2.377, 후란사는 2.459, 방식사는 2.684로 나타났다. 바다모래 및 강모래의 비중은 2.652와 2.665였고, 입도분포와 입도분석 결과 후란사를 제외한 나머지 시료는 비교적 같은 크기의 입자빈도가 높은 빈입도였다. 폐주물사의 XRF실험 결과, 원재료가 모래인 만큼 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃가 90%이상 차지함을 볼 수 있다. 폐주물사 혼합재료의 유동성 뒤채움재로의 활용을 위해 목표강도는 1000kPa 및 최소의 유동성을 가지는 각각의 배합비를 결정하였다. CBR시험 결과 28일 양생된 혼합재료의 CBR값은 약 10-15정도의 범위였고, 이는 도로의 보조기층재의 기준의 약 30-50% 정도의 범위에 속한다. 본 연구에서는 지하매설물용 또는 옹벽 등의 단순 뒤채움재로의 이용이므로 강도특성은 충분한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국과학기술부, 한국과학재단에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행결과입니다.

참고문헌

1. ACI Committee 229(1994). "Controlled Low Strength Materials (CLSM)" Concrete International, July, pp 55~64
2. Cho, J., Lee, K., Rodrigo, S. & Lee, I (2001), "The Small-Scale Retaining Wall Test of Waste Foundry Sand Mixture as Flowable Fill", ASTM Geotechnical Testing Journal, USA, (GTJ 162001244, SCI, 12월호 게재승인)