

석탄회 조분을 유효이용한 보수 모르터의 개발

Development of the Repair Mortar using Coarse Powder of Coal Ash

전진환* 조정기** 矢崎 英章*** 笠井 浩**** 和美 廣喜*****
Jeon, Jin Hwan Cho, Chung Ki Yazaki, Hideaki Kasai, Hiroshi Wami, Hiroki

ABSTRACT

The hydraulic structures such as aqueduct tunnels and the drainage canal of the hydroelectric power plant in Japan are almost old. Therefore, the concrete surface of the aqueduct tunnel has received damage by wear-out and the crack, etc. This study was to develop repair mortar mixed a coal ash coarse powder by using two kinds of high early strength cements. As a result, the repair mortar was obtained by substituting the EF cement (maid in Japan) and the MT cement (maid in South Korea) at a rate of 60:40, and substituting the coal ash 30% and the mixing rate 35% of the artificial aggregate for natural fine aggregate.

1. 서론

일본의 각 전력회사가 보유하고 있는 수력발전소는 장기 내구년수와 전력공급의 안정성·발전비용의 저감 및 자연에너지의 이용이라는 특징 때문에 상당히 많이 건설되었다. 그러나, 대표적인 전력회사인 동경전력의 경우 76%에 해당하는 발전소가 대부분 50년 이상 경과하여 설비전체의 노령화가 급속히 진행되고 있는 실정이다. 특히, 경과년수와 함께 배수로나 수로터널 등의 수리구조물이 화학적·물리적 요인으로 인한 터널콘크리트의 표층부 열화 및 마모·균열 등으로 인한 손상으로 문제가 되고 있다. 이러한 수로 터널내부의 열화 부분에 대한 보수공사는 수로단면의 여유의 유무, 터널의 형태에 따라서 몇 가지 공법이 적용되고 있는데, 그 중에서 최근 안전성·작업성·경제성 등의 효율성이 높은 CLiP 공법(Clean Lining by Pumping)이 적용되고 있다. 이 공법의 적용에 필요한 모르터의 작업성 및 품질확보를 위해 ①2시간 압축 강도가 5N/mm² 이상(2~4시간 정도에 탈형 가능할 것), ②유동성으로는 셀프플로우(진동을 주지 않는 상태에서의 플로우)가 250 mm이상, ③건조에 의한 균열이 발생하지 않을 것(6×10^{-6} 이하 ; R.H80%) 등과 같은 조건이 요구된다.

따라서, 본 실험은 재자원화 이용율이 낮은 석탄회 조분의 유효이용을 도모하기 위해, 초속경시멘트에 석탄회와 인공골재를 혼입한 양질의 급경성 보수 모르터 개발을 목적으로 하였다.

* 정회원, 鹿島建設(株)技術研究所·研究員

** 정회원, 두영 T&S·대표

*** 정회원, 三榮工業(株)·社長

**** 정회원, 鹿島建設(株)技術研究所·主任研究員

***** 정회원, 鹿島建設(株)技術研究所·所次長

2. 실험개요

2.1 개발단계 및 평가항목

보수 모르타의 개발에 있어서 상기의 조건을 만족하는 조합을 선정하여 현장에 적용하기 위해, 2 단계의 개발과정을 설정하였다. 각 단계에 해당하는 실험내용과 평가항목을 표 1에 나타냈다.

표 1 개발단계에 따른 실험내용과 평가항목

단계	실험내용	평가항목
I	재료 및 조합선정 (시멘트종류에 따른 잔골재 비율, 시멘트의 치환율, 석탄회의 치환율, 인공골재의 혼입율)	유동성, 압축강도
II	수축성능평가 (물시멘트비의 변화, 단계 I 에서 선정한 조합으로 실시)	유동성, 압축강도, 수축성

2.2 사용재료

본 실험에 사용된 재료를 표 2에 나타냈다. 시멘트는 초속경 타입의 것으로, 일본산(이하 EF시멘트라고 함) 과 한국산(이하 MT시멘트라고 함)을 사용하여 실험하였다. 시멘트종류별 화학성분을 표 3에 나타냈다.

표 2 사용재료

사용재료	산지 및 물성	
시멘트	EF시멘트(日本엘레혼화성공업), 밀도 2.0g/cm ³	
	MT시멘트(한국두영 T&S), 밀도 2.8g/cm ³ , 비표면적 4,080cm ² /g	
잔골재	육사	静岡산(5mm이하), 표건밀도 2.64g/cm ³ , 흡수율 1.38%, 조립율 2.87
	석탄회	III종 조분(常磐共同火力), 표건밀도 2.11g/cm ³ , 흡수율 1.38%, 조립율 2.87, 비표면적 4,080cm ² /g, 강열감량 7.51%
	인공골재	메사라이트(5mm이하), 절건밀도 1.60g/cm ³ , 표건밀도 1.88g/cm ³ , 흡수율 14.5%,
혼화제	유동화제(昭和電工建材주식회사)	

표 3 각시멘트별 대표적인 화학성분(%)

시멘트종류	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	SiO ₂
EF	15.4	2.1	48.3	1.5	7.9	22.4
MT	27.1	2.62	41.5	2.11	16.7	4.77

2.3 모르타 조합

본 실험의 조합을 표 4에 나타냈다. 단계 I 에서는 초기강도(2시간)를 확보하기 위하여 물시멘트비를 40%로 고정하고, 시멘트 종류에 따른 잔골재 비율, 시멘트의 치환율(용적비), 석탄회의 치환율(잔골재에 대한 용적비), 인공골재의 혼입율에 대해 용적배합설계를 하였다. 석탄회의 치환율에 대해서는 석탄회를 잔골재와 동일하게 취급하기 위해 석탄회와 물을 혼합하여 유동화가 일어나는 최소 수량(가수율:29%)을 표건상태로 가정하여 조합설계를 하였다. 또한, 인공골재의 혼입율에 대한 조합설계에서는 24시간 흡수상태를 표건상태로 하였다.

2.4 시험항목 및 비빔방법

2.4.1 유동성시험 및 비빔방법

유동성시험으로서 셸프플로우치(진동을 주지 않는 상태에서의 플로우치)를 측정하고, 5분 마다 경시변화를 측정하였다. 공기량시험은 JIS A 1116, J₁₄로트 유하시험은 JSCE-F 541, 판입저항시험은 JIS

A 1147, 단위용적질량은 JIS A 1116에 준하여 측정하였다. 각 조합에 대한 목표값은 공기량이 3±1.5%, J₁₄로트 유하시간이 20±5초, 관입저항시험의 초결시간이 50분 정도(비빔과 타설시간 포함)로 정하였다.

비빔방법은 잔골재(1/2)+시멘트+물+석탄회+잔골재(1/2)의 순으로 투입하고, 1분간 저속비빔을 행한 다음, 2분간 저속비빔하여 전체 3분간 비빔을 행하였다.

표 4 각 단계별 모르터 조합표

단계	기호	W/B	S/B	단위중량(kg/m ³)						유동화계
				W	EF	MT	FA	S	MA	
I	M40-EF-S0	40	0	431	1078	0	0	0	0	0.6
	M40-EF-S1.0		1	303	759	0	0	759	0	0.6
	M40-EF-S1.5		1.5	264	661	0	0	991	0	0.6
	M40-EF-S2.0		2.0	234	585	0	0	1170	0	0.6
	M40-MT-S0		0	512	0	1218	0	0	0	0.2
	M40-MT-S1.0		1.0	342	0	854	0	854	0	0.2
	M40-MT-S1.5		1.5	293	0	732	0	1098	0	0.2
	M40-MT-S2.0		2.0	256	0	640	0	1281	0	0.2
	M40-EF70-MT30		2.1	234	410	178	0	1237	0	0.5
	M40-EF60-MT40		2.2	234	351	234	0	1259	0	0.5
	M40-EF50-MT50		2.2	234	293	293	0	1281	0	0.6
	M40-EF20-MT80		2.3	234	117	468	0	1347	0	0.3
	M40-EF60-MT40-FA10		2.1	234	351	234	62	1133	0	0.5
	M40-EF60-MT40-FA20		2.0	234	351	234	123	1007	0	0.6
	M40-EF60-MT40-FA30		1.9	234	351	234	185	881	0	0.6
	M40-EF60-MT40-FA30-MA35		1.7	234	351	234	185	441	314	0.6
M40-EF60-MT40-FA30-MA70	1.5	234	351	234	185	0	627	0.6		
II	M40-EF60-MT40-FA30-MA35	40	1.7	234	351	234	185	441	314	0.6
	M50-EF60-MT40-FA30-MA35	50	1.7	234	331	221	174	415	296	0.6
	M60-EF60-MT40-FA30-MA35	60	1.7	234	313	209	165	393	280	0.6

2.4.2 경화 모르터시험

압축강도시험은 $\phi 5 \times 10 \text{cm}$ 의 공시체를 이용하여 2시간, 1일, 7일, 28일 재령에 측정하였고, 실제 환경을 고려하여 시험재령까지 20℃, R.H.80%실에서 봉합양생을 행하였다. 단계 II에서의 수축성시험(모르터의 길이변화시험)은 JIS A 1129에 준하여 행하였고, 비빔 후 4시간에 탈형하여 1주까지 20℃, R.H.80%실에서 봉합양생을 실시한 후 20℃, R.H.60%에서 재령1일, 3일, 7일, 28일, 56일에 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 재료 및 조합선정 실험

3.1.1 모르터의 유동성상

그림 1에 나타난 바와 같이 시멘트종류와 잔골재의 비율에 있어서의 초기 셸프플로우는 각 시멘트에 대하여 잔골재 비율이 증가함에 따라 저하하는 것으로 나타났다. 경시변화에 따른 셸프플로우는 EF시멘트의 경우 시간이 경과함에 따라 서서히 저하하는 경향을 보였으나, MT시멘트의 경우 EF시멘트보다 셸프플로우치가 5분 후 급격하게 저하하는 경향을 보였다. 또한, 초기강도발현의 정도를 확인하기 위한 관입저항시험 결과는 그림 2에 나타난 바와 같이, EF시멘트의 경우 대부분 40~45분 정도에 초결이 시작되어 종결이 45~50분 정도에 발생하였는데, 초결에서 종결에 걸린 시간이 5분 정도로 급격하게 일어났다. 그러나, MT시멘트의 경우는 초결이 65~73분 정도에 시작되어 10분 후인 75~85

분에 종결이 일어나 EF시멘트보다 초결이 25분 정도, 종결이 30분 정도 늦게 일어나는 경향을 보였다. 각 시멘트에 대한 잔골재의 비율의 영향은 잔골재비율이 증가함에 따라 초결과 종결시간이 증가하는 경향을 보였다. 따라서, 초결 50분에서 종결 60분의 모르터를 얻기 위해 두 종류의 시멘트의 치환율에 대하여 검토하였다.

시멘트의 치환율에 있어서의 초기 셀프플로우치는 EF시멘트를 단독으로 사용했을 경우를 제외하고 대부분 300mm를 나타내었다. 셀프플로우의 경시변화에 대한 경향은 MT시멘트의 치환율이 증가함에 따라 셀프플로우가 크게 저하하는 경향을 보였다. 또한, 관입저항시험 결과에서는 MT시멘트의 혼입율이 증가함에 따라 초결이 늦어지고, 초결에서 종결까지의 시간도 길어지는 경향이 나타났다. 따라서, 비빔 후 50분 정도에서 경화가 시작된 EF시멘트와 MT시멘트의 비율 60:40(중량비)에 대하여 실험을 진행하였다.

잔골재 용적에 대한 석탄회 치환율의 유동성상을 그림 3에 나타냈다. 석탄회 혼입율30%의 경우 석탄회를 넣지 않은 것과 동등한 유동성을 나타내었다. 그림 4에 나타낸 관입저항시험에 있어서 석탄회의 혼입율에 따른 뚜렷한 경향은 볼 수 없었으나, 석탄회 치환율과 관계없이 모든 조합의 초결에서 종결시간이 45~55분 범위로 나타났는데, 석탄회의 유효이용을 위해 석탄회의 혼입율을 30%로 고정하여 인공골재 혼입율에 관한 실험을 진행하였다.

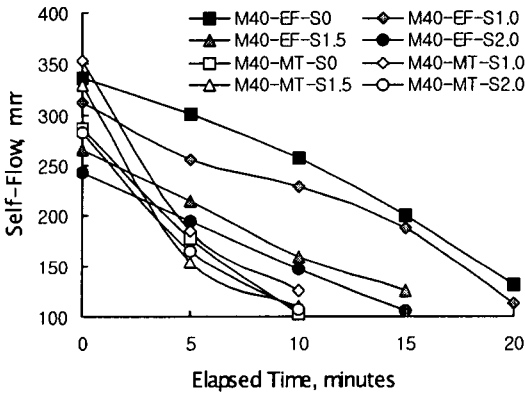


그림 1 시멘트종류에 따른 잔골재의 비율에 있어서 셀프플로우치의 변화

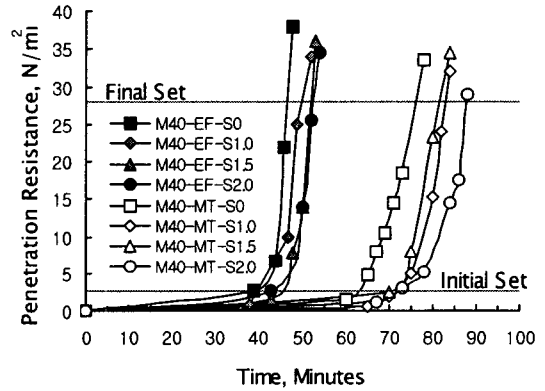


그림 2 시멘트종류에 따른 잔골재의 비율에 있어서 관입저항치의 변화

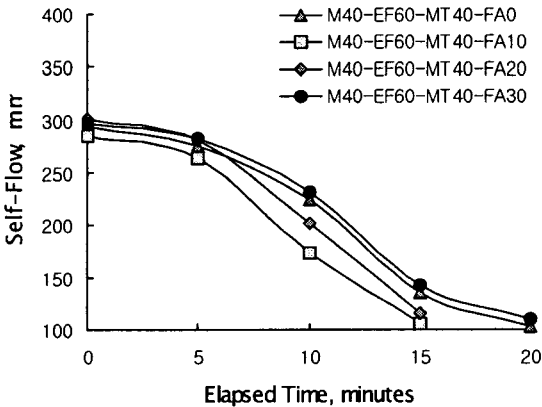


그림 3 석탄회의 치환율에 따른 셀프플로우의 변화

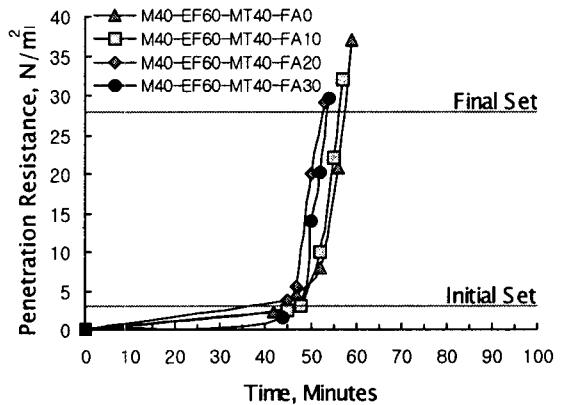


그림 4 석탄회의 치환율에 따른 관입저항치의 변화

인공골재의 혼입율에 의한 유동성상에 있어서는, 동량의 유동화제 첨가에 대하여 천연 잔골재에 대한 인공골재의 혼입율이 증가함에 따라 초기 셀프플로우치가 증가하는 것으로 나타났고, 경과시간에 따른 셀프플로우치도 서서히 저하하는 경향을 나타내었다. 판입저항시험 결과에 대해서는 인공골재의 혼입율이 증가함에 따라 초결이 다소 늦어지는 경향이 있었는데, 초결에서 종결까지의 시간은 크게 변화 없이 50~60분 정도로 나타났다.

3.1.2 경화 모르터의 압축강도

시멘트 종류에 따른 잔골재의 비율에 있어서의 압축강도 시험결과를 그림 5에 나타냈다. 시멘트 종류에 대한 압축강도의 변화는 EF시멘트가 MT시멘트보다 높게 나타났는데, 2시간 압축강도의 경우 EF시멘트가 15N/mm² 정도로 나타났고, MT시멘트가 3~6 N/mm² 정도로 EF시멘트보다 낮게 나타났다. EF시멘트의 압축강도는 재령에 따라 서서히 증가한 반면, MT시멘트는 재령 7일 이후의 압축강도의 증진이 매우 적게 나타났다. 잔골재의 비율에 따른 영향에 대해서는 잔골재 비율이 높아짐에 따라 강도가 저하하는 경향을 나타내었다. 시멘트의 치환율에 있어서는 EF시멘트에 대한 MT시멘트의 치환율이 증가함에 따라 압축강도가 저하하는 것으로 나타났으며, EF시멘트와 MT시멘트의 비율 70 : 30이 가장 높은 압축강도를 발현하였다. 석탄회의 치환율에 있어서의 압축강도 결과를 그림 6에 나타냈다. 2시간 압축강도가 10N/mm² 이상을 나타냈으며, 재령 7일 이후부터는 석탄회의 혼입율이 증가함에 따라 압축강도가 조금씩 높아지는 경향을 보였는데, 장기적으로는 석탄회 혼입에 따른 포졸란반응에 의해 압축강도가 더욱 증가할 것으로 예상된다. 인공골재의 혼입율에 있어서의 압축강도 시험결과는 2시간 압축강도가 모두 10N/mm² 이상을 나타냈으며, 천연 잔골재에 대한 인공골재의 혼입율이 증가함에 따라 압축강도가 떨어지는 경향을 나타내었다. 이것은, 인공골재가 천연골재에 비해 골재 자체의 강성이 낮기 때문으로 사료된다.

3.2 수축성능평가 실험

3.2.1 모르터의 유동성상

단계 I에서 선정된 조합에 대해 물시멘트비에 따른 영향에 관하여 실험을 행하였다. 모든 조합에 동일량의 유동화제를 첨가하였는데, 물시멘트비가 증가함에 따라 초기 셀프플로우치가 높아지는 경향을 보였으나, 셀프플로우의 경시변화는 완만하게 저하하는 것으로 나타났다. 판입저항시험 결과, 물시멘트비가 증가할수록 초결과 종결이 늦어지는 경향을 나타냈는데, 물시멘트비 50%의 조합이 유동성에 관한 요구조건을 만족하는 것으로 나타났다.

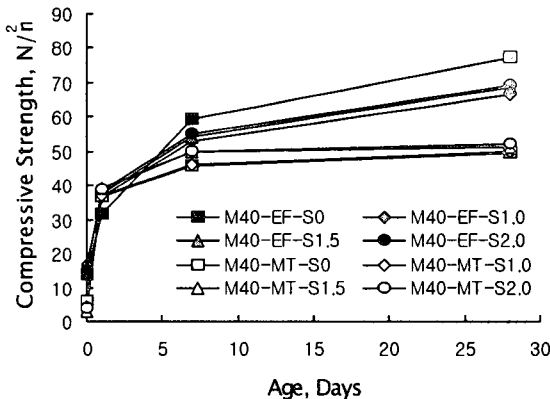


그림 5 시멘트 종류에 따른 잔골재의 비율에 있어서의 압축강도의 결과

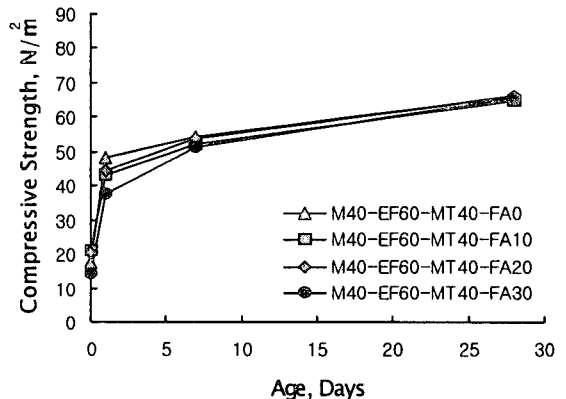


그림 6 석탄회의 치환율에 있어서의 압축 강도의 결과

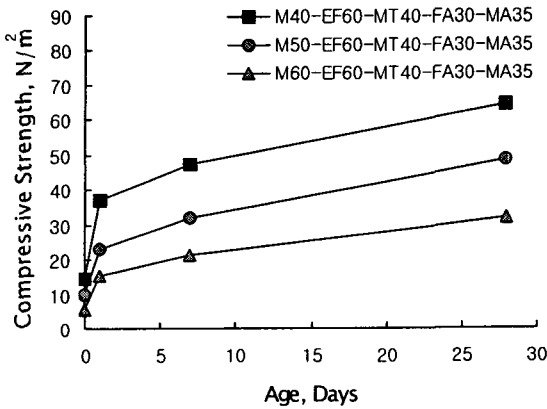


그림 7 물시멘트비에 따른 압축강도의 변화

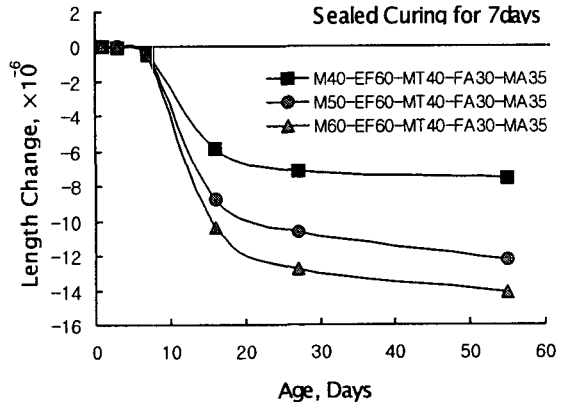


그림 8 물시멘트비에 따른 건조수축의 변화

3.2.2 압축강도와 수축성 시험

물시멘트비에 따른 압축강도의 시험결과를 그림 7에 나타냈다. 물시멘트비가 낮아짐에 따라 압축강도가 현저하게 증가하는 것으로 나타났다. 2시간 압축강도에 있어서 전부 5N/mm² 이상을 나타냈으며 재령에 따라 압축강도의 차이가 커지는 경향을 보였다.

수축성 시험으로서 길이변화율의 결과를 그림 8에 나타냈다. 전체적으로 길이 변화율이 목표치보다 높게 나타났는데, 이것은 실제 환경보다 열악한 조건(20℃, R.H60%)에서 실험을 진행했기 때문으로 사료된다. 물시멘트비가 증가함에 따라 길이변화율도 증가하였는데, 특히 물시멘트비 60%의 경우가 물시멘트비 40%보다 2배 정도 증가한 것으로 나타났다. 질량 변화율의 결과에 있어서는 길이변화율과 동일한 경향을 보였는데, 물시멘트비 60%의 경우 질량 변화율이 물시멘트비 40%보다 3배 이상 크게 변화한 것으로 나타났다. 이것은, 인공골재의 높은 흡수율에 따른 영향으로 사료된다.

4. 결론

석탄회 조분의 유효활용과 함께 초속경시멘트를 사용한 양질의 보수 모르터 개발에 대하여 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) EF시멘트와 MT시멘트의 비율을 60 : 40로 고정하고, 석탄회를 천연 잔골재에 대해서 30% 치환함과 동시에 인공골재를 35% 혼입함으로써 CLIP공법에 만족하는 보수 모르터의 제조가 가능하였다.
- 2) 물시멘트비의 차이에 의한 수축성능평가 실험에 대해서는, 물시멘트비 40%가 가장 좋은 결과를 보였으나, 실제 시공환경 조건(R.H80% 이상)에서는 물시멘트비 50%의 조합도 성능 요구조건을 만족하는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 中村 隆幸 他、水路トンネル補修のロボット化構想電力土木、No.243、1933、p40-481.
2. 松尾榮治 他、フライアッシュを細骨材代替に用いたモルタルの配合に関する基礎的な研究、日本コンクリート工學年次論文集、Vol.22、No.2、2000、p1141-1146.