

콘크리트용 잔골재로서 高爐水碎슬래그의 物性에 대한 實驗的 研究

An Experimental Study on the Properties of Water Cooled Blast Furnace Slag as a Fine Aggregate for Concrete

文翰英* · 崔然汪**

Moon, Han Young · Choi, Yun Wang

Abstract

This paper is the part of fundamental study considering whether the unprocessed water cooled blastfurnace slag, by-product of iron works, can be useful for some fine aggregate of mortar and concrete.

The acquired results in this study show that the qualities of the water cooled blastfurnace slag produced in the state of raw material in the country in not good for using as a fine aggregate of mortar and concrete. To be used as a fine aggregate of concrete the qualities need to be improved in the process of manufacture.

요 지

製鐵産業의 副産物로 발생하는 高爐水碎슬래그를 가공하지 않은 상태 그대로 콘크리트용 잔골재로 일부 대체하여 사용할 수 있는지 여부를 알아보기 위하여 실시한 기초연구의 일부이다.

본 연구 실험결과 국내에서 발생되는 高爐水碎슬래그를 가공공정 내지는 입도조정 등의 과정을 거치지 않은 상태로 모르타 및 콘크리트용 잔골재로 일부 대체하여 사용하기 위해서는 품질면에서 약간의 개선해야할 문제점이 있다고 생각되었다.

1. 서 론

제철소에서 銑鐵을 제련할 때 부산물로 발생하는 熔融狀態의 고로슬래그에 냉각수나 찬공기를 고압으로 분사하게 되면 고로슬래그가 모래와 같이 파쇄되어 多孔質의 유리상인 急冷슬래그가 되며 이 急冷슬래그는 냉각처리방법에 따라 일반적으로 水

碎슬래그와 空碎슬래그로 분류한다.⁽¹⁾ 水碎슬래그(이하 高爐水碎슬래그 또는 高爐슬래그水碎砂 라고도 함)를 微粉碎하여 포틀랜드시멘트 클링커에 혼합하여 高爐슬래그시멘트로 사용하는 방법⁽²⁻⁵⁾과 콘크리트용 잔골재로 사용하는 방법이 있으며,⁽⁶⁻⁹⁾ 우리나라에서는 KS F 2559 콘크리트용 고로슬래그 잔골재(granulated blast-furnace slag fine aggregate for concrete) 규격이 이미 제정된 바 있으나, 이와 관련된 연구보고서 등은 찾아보기 어려운 실정이다.

* 정희원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

그런데 일본의 경우 高爐水碎슬래그의 용융온도를 달리하므로써 軟質水碎슬래그와 硬質水碎슬래그로 구분하며 연질수쇄슬래그는 유리 함유율이 높으며 강한 潛在水硬性 때문에 주로 高爐슬래그시멘트의 원료로 사용하며, 경질수쇄슬래그는 잔골재용으로 사용되고 있으며,⁽¹⁰⁾ 土木學會와 建築學會에서도 각각 設計施工指針이 제정되어 있으며 많은 연구성과가 발표되고 있다.^(11,12)

최근 우리나라에서는 건설경기로 인한 골재의 부족현상이 심각한 사회문제화 되고 있는 실정을 감안하여 불매 산업부산물인 수쇄슬래그를 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 연구는 자원을 절약한다는 측면에서도 필수불가결한 시도라 생각된다.

본 연구는 포항종합제철소에서 발생하는 수쇄슬래그를 가공하지 않은 상태로 콘크리트용 잔골재의 일부로 대체하여 사용하였을 때 어떤 문제점이 있는지를 알아보기 위한 기초연구의 일환으로 수쇄슬래그의 화학성분, 물리적성질과 모르타 및 콘크리

트의 배합, 경화한 콘크리트의 제강도 등 실험결과에 대하여 고찰하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

(1) 시멘트 : 보통포틀랜드시멘트로서 화학성분 및 물리적성질은 표 1과 같다.

(2) 골재 : 잔골재와 굵은골재 다같이 한강산 강모래와 강자갈로서 물리적성질은 표 2와 같다.

(3) 고로수쇄슬래그 : 잔골재와 대체하여 사용하기 위한 수쇄슬래그의 화학성분 및 물리적성질은 각각 표 3 및 표 4와 같으며, 한편 입도는 체분석하여 조립률이 다른 5종류(F.M=1.75, 2.15, 2.70, 3.38 및 3.85)로 조정하였다.

2.2 실험기구 및 방법

(1) X線回折分析 : 수쇄슬래그의 광물조성을 알아

표 1. 시멘트의 화학성분 및 물리적성질

화 학 성 분 (%)						lg · loss (%)	비표면적 (cm ² /g)
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	SO ₃		
21.8	5.84	3.56	60.62	3.54	2.58	0.95	3,422

표 2. 잔골재 및 굵은골재의 물리적성질

종류	항목	굵은골재 최대치수(mm)	비중	흡수율 (%)	조립율 (F.M)	유 기 불순물	단위용적중량 (kg/m ³)	실적율 (%)
	굵은골재		25	2.68	0.90	7.20	—	1,734
잔 골재		—	2.62	1.50	2.18	양호	1,620	61.8

표 3. 고로수쇄슬래그의 화학성분

종류	항목	CaO	SiO ₂	Al ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	S
	슬래그		40.9	36.2	15.2	0.5	6.7	0.52	0.1	0.23
KS F 2559		45.0 이하	—	—	3.0 이하	—	—	0.5 이하	—	2.0 이하

표 4. 고로수쇄슬래그의 물리적성질

종류	항목	비 중	흡수율 (%)	조립율 (F.M)	유 기 불순물	단위용적중량 (kg/m ³)	실적율 (%)
	슬래그 잔골재		2.26	5.50	3.11	양호	1,133
KS F 2559		2.50 이상	1.5 이하	—	—	1,1450 이상	—

보기 위하여 시료에 대한 측정조건을 CuK(Ni, filter) 30 kv, 20 mA, scan 8°/min, full scale 14 cps, 2θ = 10°~80°로 정하여 분석하였다.

(2) 走査型電子顯微鏡(SEM) : 시료의 입형과 표면조직을 비교 관찰하기 위하여 사용된 기구는 JEOL (JSM-35CF)제 현미경으로 시료를 임의의 비율로 확대 촬영할 수 있다.

(3) 乾燥收縮試驗 : KS F 2424 모르터 및 콘크리트의 길이변화 시험방법에 준하여 실내온도 23±2°C, 상대습도 55%에서 48시간 양생한 후 5일간 수증양생하여 재령 50일까지 공기중에서 양생하였다.

(4) 강도 및 탄성계수 : 직경 10 cm의 원주공시체를 제조하여 표준양생 한후 KS F 2405와 KS F 2423 시험방법에 따라 압축 및 인장강도시험을 실시하였으며, 탄성계수는 콤프레소미터를 사용 KS F 2438의 시험방법에 의하여 구하였다.

2.3 배합

모르터 및 콘크리트용 배합시 수쇄슬래그를 강모래에 대하여 중량비로서 0, 20, 40 및 60% 4단계로 대체하였으며 콘크리트의 경우 굵은골재의 최대치수 25 mm, 단위시멘트량 350 kg/m³, 잔골재율 40%, 공기량 1.5±1% 및 슬럼프 12±1 cm를 목표로 하였다. 이때 수쇄슬래그를 20%씩 대체하는데 따라 동일 슬럼프를 유지하기 위하여 물시멘트비가 1~2% 정도 증가되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 잔골재로서 高爐水碎슬래그의 品質

수쇄슬래그를 콘크리트용 잔골재와 일부 대체하여 사용할 수 있는지 여부를 알아보기 위하여 수쇄슬래그의 화학성분 및 물리적성질에 대하여 고찰하였다.

먼저 포항종합제철에서 발생된 수쇄슬래그의 화학성분을 분석하여 KS F 2559 규격과 비교 정리한 것이 표 3으로서, 이 표의 시료는 한국공업규격을 만족하고 있음을 알 수 있다. 그리고 鑛物組成을 알아보기 위하여 X선 회절분석한 결과가 그림 1이며, 본 실험에 사용된 수쇄슬래그는 松下⁽¹⁾의 분석내용과도 같은 유리질의 非晶質構造로서 仕入의 연구⁽¹³⁾와 같이 콘크리트의 품질에 나쁜 영향을 미치지

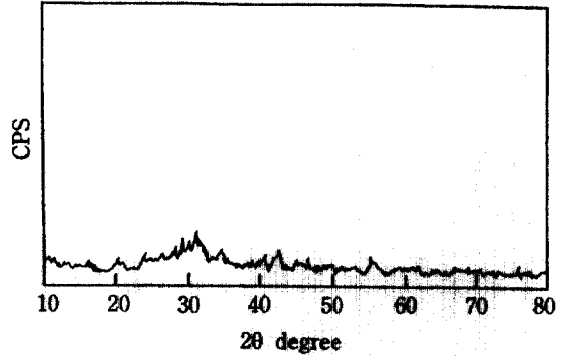


그림 1. 수쇄슬래그의 X선회절분석

않는 화학적으로 안정하다고 판단되었다.

그러면 콘크리트용 골재를 평가하는데 기본이 되는 비중, 흡수량 및 단위용적중량을 측정할 것이 표 4이며, 수쇄슬래그의 비중, 흡수율은 각각 2.26, 5.5%이며 단위용적중량 1,133 kg/m³로써 다같이 한국공업규격 2.50 이상, 1.5% 이하 및 1,450 kg/m³ 이상의 규정에 미달되는 값을 나타내었다.

이번에는 수쇄슬래그와 강모래의 입형과 표면상태를 30배 확대 촬영한 것이 사진 1 및 사진 2이다.

이들 사진에서 알 수 있듯이 수쇄슬래그의 입형은 부순돌과 같은 불규칙하고 각이 많은 모래모양을 하고 있어 실적률이 강모래보다 훨씬 작은 50.1% 정도에 지나지 않았다. 또한 수쇄슬래그의 표면상태는 강모래와 달리 포러스(porous)한 부분이 상당 존재하며 치밀하지 못한 조직임을 알 수 있었다. 이 포러스한 多孔質은 슬래그가 1500°C 정도의 高溫熔融狀態에서 急冷시키는 과정에서 불규칙한 기포가 생성된 현상으로 이 부분에서 흡수량이 크게 요구되었다고 생각된다.

長瀧⁽¹⁴⁾는 수쇄슬래그의 제조공정시 용융온도를 달리하므로써 강도가 큰 硬質水碎슬래그를 콘크리트용 잔골재로 사용하는 것이 일반적이라 한다. 그런데 우리나라 수쇄슬래그는 軟質水碎슬래그에 상당하므로 콘크리트용 잔골재로서 부적합하다고 생각되었다.

끝으로 수쇄슬래그를 체분석하여 조립률이 상이한 5종류의 입도로서 모르터를 제조하였으며, 한편으로는 조립률 2.70인 수쇄슬래그로 강모래와 6단계로 대체한 모르터의 흐름값을 측정하여 각각 정리한 것이 그림 2이다.

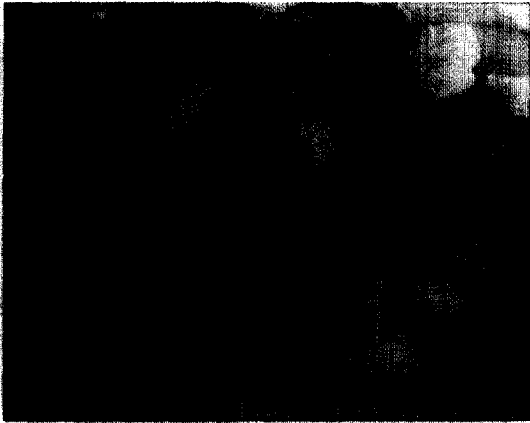


사진 1. 강모래의 입형(30배 확대)

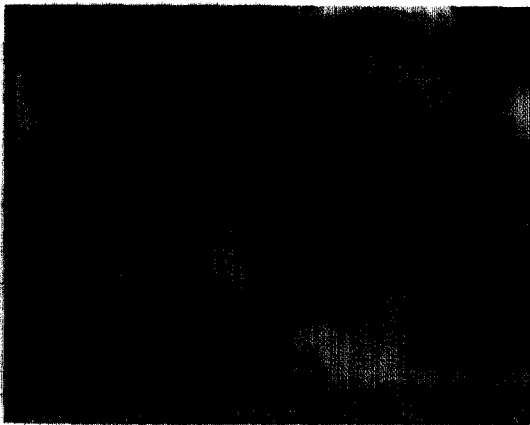


사진 2. 수쇄슬래그의 입형(30배 확대)

이 그림에서 수쇄슬래그의 조립률 2.70인 시료로 제조한 모르터의 흐름값이 크게 나타남을 알 수 있으며, 조립률 2.70인 시료는 잔골재 표준입도곡선의 중간위치에 있는 입도분포임을 알 수 있었다.

그래서 이 수쇄슬래그로써 20%씩 대체한 모르터의 콘시스턴스를 측정해 보면 그림 2에서와 같이 대체율이 증가하는데 따라 흐름값이 3.5~6.0% 범위에서 거의 직선적으로 크게 저하됨을 알 수 있다.

3.2 高隲水碎슬래그로 代替한 모르터의 物性

수쇄슬래그로써 60%까지 4단계로 대체한 모르터를 재령 60일까지 압축강도를 측정한 것이 표 5이며, 강모래만을 사용한 모르터(대체율 0%)의 재령 28일

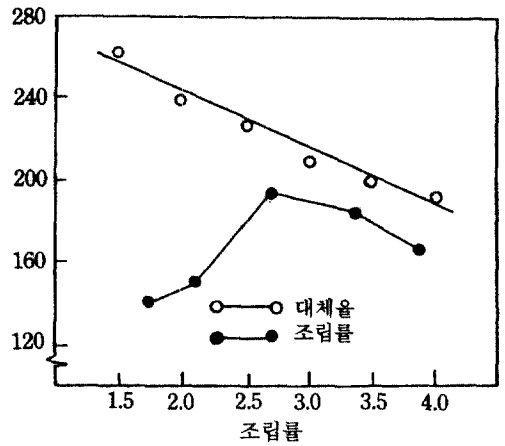


그림 2. 수쇄슬래그 잔골재의 조립률 및 대체율과 흐름값

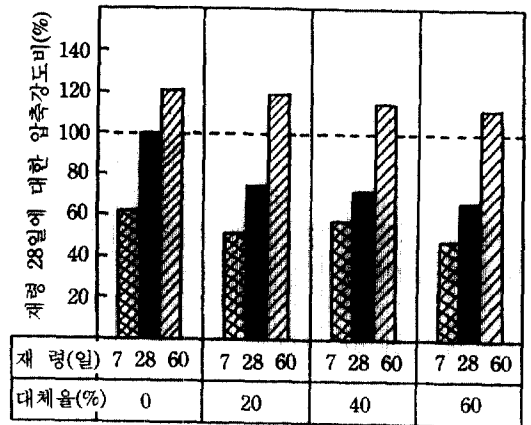


그림 3. 수쇄슬래그로 대체한 모르터의 압축강도비

압축강도 100에 대한 재령별 압축강도비를 나타낸 것이 그림 3이다.

표 5에서 재령 7일 및 28일 모르터의 압축강도는 대체율이 증가하는데 따라 강도가 크게 저하됨을 알 수 있으나, 그림 3의 재령 60일에서는 대체율에 따른 압축강도비의 변동이 거의 없으며 재령이 증가하는데 따라 대체율이 클수록 강도증진속도가 빨라지는 결과를 나타내었다. 이러한 현상은 수쇄슬래그의 潛在水硬性에 기인된 결과로 생각된다.

표 5. 수쇄슬래그로 대체한 모르터의 압축강도

재령(일) 대체율(%)	항목 압축강도(kg/cm ²)		
	7	28	60
0	173	282	339
20	150	217	338
40	164	205	328
60	138	183	316

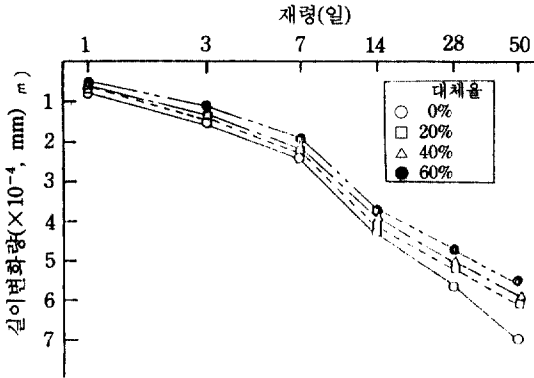


그림 4. 수쇄슬래그로 대체한 모르터의 길이변화

한편 수쇄슬래그로써 대체한 모르터의 건조수축률을 알아보기 위하여 대체율 4단계, 재령 50일까지 모르터 공시체에 의한 길이변화량을 측정하여 정리한 것이 그림 4이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 강모래만을 사용한 모르터의 건조수축값이 수쇄슬래그로 대체한 모르터 보다 크게 나타났으며, 대체율이 증가하는데 따라 건조수축값이 오히려 감소되는 결과임을 알 수 있다. 이러한 실험결과는 일본의 몇몇 연구내용과 비슷하며⁽¹⁵⁾ 수쇄슬래그를 일부 잔골재와 대체함으로써 건조수축값이 얼마간 작아지는 유효한 결과를 얻었다.

3.3 高爐水碎슬래그로 代替한 콘크리트의 強度

수쇄슬래그로 60%까지 대체한 콘크리트의 압축강도, 인장강도 및 탄성계수를 재령 60일까지 측정된 결과가 표 6이며 대체율 별로 압축, 인장강도 및 탄성계수로 각각 정리한 것이 그림 5 및 6이다.

그림 5에서 수쇄슬래그로 대체한 경우, 모르터의 압축강도 시험결과와는 달리 대체율이 증가하는데 따라 압축강도, 인장강도 각각 6% 및 7% 정도 감소되는 결과를 나타내었다.

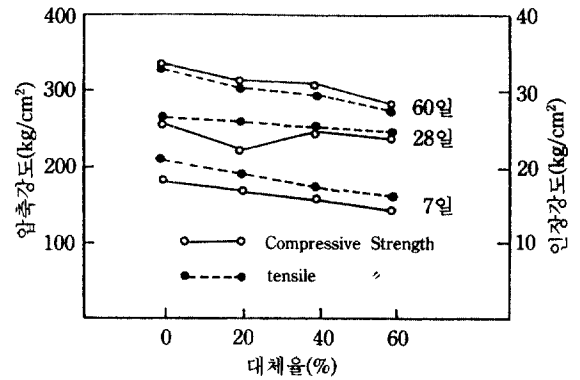


그림 5. 수쇄슬래그로 대체한 콘크리트의 압축 및 인장강도

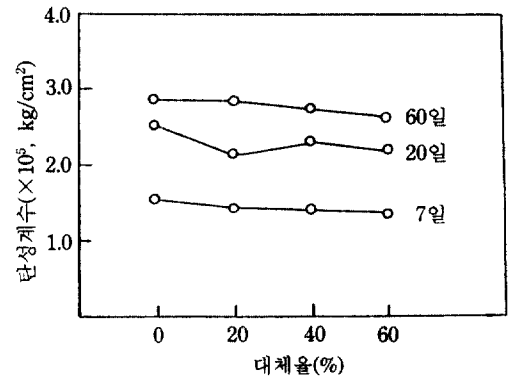


그림 6. 수쇄슬래그로 대체한 콘크리트의 탄성계수

표 6. 수쇄슬래그로 대체한 콘크리트의 제강도

재령(일) 대체율	항목 압축강도(kg/cm ²)			항목 인장강도(kg/cm ²)			항목 탄성계수(kg/cm ²)		
	7	28	60	7	28	60	7	28	60
0	182	253	335	21	26	33	1.56	2.52	2.85
20	169	222	315	19	26	30	1.48	2.14	2.81
40	154	246	305	17	25	29	1.42	2.31	2.74
60	141	238	280	16	24	27	1.35	2.20	2.66

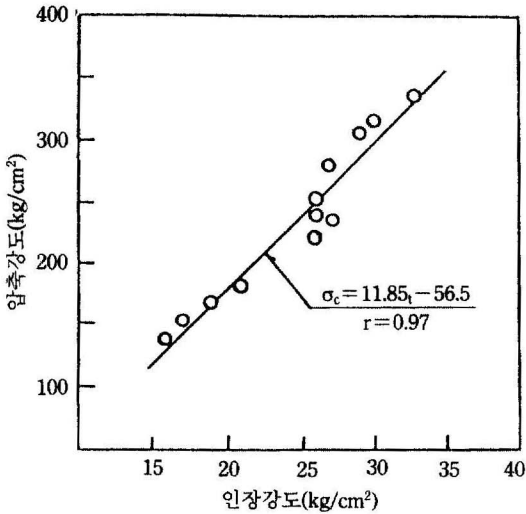


그림 7. 수쇄슬래그로 대체한 콘크리트의 압축강도와 인장강도와의 관계

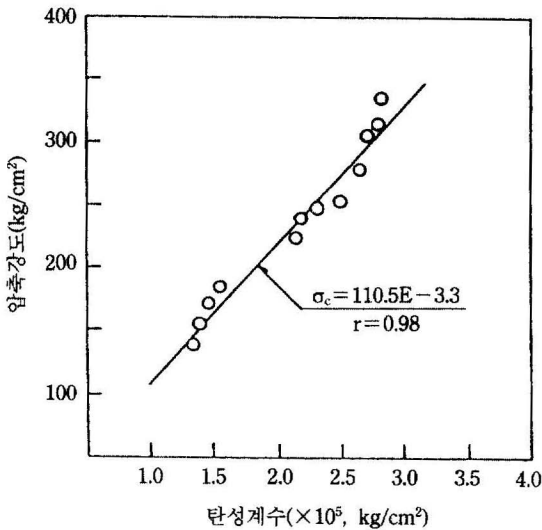


그림 8. 수쇄슬래그로 대체한 콘크리트의 압축강도와 탄성계수와의 관계

그런데 경질수쇄슬래그를 잔골재와 대체한 콘크리트의 강도는 동일한 물시멘트비일 때 보통콘크리트의 압축 및 인장강도와 거의 동일한 정도라고 하는 실험결과와 6개월 이상 장기강도는 오히려 크다고 하는 연구결과가 있다.⁽¹⁸⁾

이와 같이 상이한 결과를 분석해 보면 앞서 배합에서도 언급한 바와 같이 본 연구에서 수쇄슬래그를 20%씩 대체하는데 따라 물시멘트비가 증가되

었을 뿐만 아니라 수쇄슬래그가 연질수쇄슬래그에 상당하며, 잔골재로써의 물리적성질이 규격에 미달 되는 점 등이 원인이 되었다고 생각된다.

長瀧에 의하면⁽¹⁹⁾ 수쇄슬래그를 잔골재로 사용한 콘크리트의 탄성계수는 보통 콘크리트와 거의 차이가 없다고 한다. 그러나 본 실험에서는 수쇄슬래그의 대체율이 증가하는데 따라 재령에 관계없이 탄성계수값이 그림 6에서와 같이 약간씩 저하되는 경향을 나타내었다.

이번에는 수쇄슬래그로 60%까지 대체한 이들 콘크리트의 압축강도와 인장강도 및 압축강도와 탄성계수와의 관계로 정리한 것이 각각 그림 7 및 8이다.

그림 7에서 수쇄슬래그로 대체한 콘크리트의 재령 60일까지의 압축강도와 인장강도와의 사이에는 보통콘크리트와 비슷한 강도비(압축강도에 대한 인장강도비)가 8.5~10.5 정도이며, 상관계수 0.97 정도의 좋은 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 한편 압축강도와 탄성계수와의 사이에도 상관계수 0.98의 직선적인 좋은 상관관계가 있음을 알 수 있으며, 이러한 실험결과를 依田,⁽²⁰⁾ 長瀧⁽²¹⁾의 실험연구와도 유사한 연구내용으로 생각된다.

4. 결 론

(1) 고로수쇄슬래그의 광물조성을 분석해 본 결과 거의 대부분이 유리질인 非晶質構造로서 화학성분은 한국공업규격을 만족하나 비중, 흡수량 및 단위용적중량 등 물리적성질은 강모래보다 크게 떨어지는 품질임을 알 수 있다.

(2) 고로수쇄슬래그의 입형은 부순돌과 같이 각이 많은 형상이며 표면상태는 포러스한 부분이 상당량 존재하며, 치밀하지 못한 조직으로 강모래만을 사용한 모르타나 콘크리트와 동일한 콘시스템을 얻기 위해서는 단위수량이 크게 요구되는 문제점이 있다.

(3) 고로수쇄슬래그로 대체한 모르타의 압축강도는 대체율이 증가하는데 따라 초기재령에서는 약간 작으나 재령 60일에서는 보통 모르타와 거의 동등한 정도의 강도를 나타내었다. 한편 모르타의 건조수축값은 고로수쇄슬래그의 대체비율이 증가하는데 따라 약간 작은 좋은 결과를 나타내었다.

(4) 고로수쇄슬래그로 대체한 콘크리트의 강도 및 탄성계수는 다같이 대체율이 증가하는데 따라 약간 저하하는 결과를 나타내었으나 압축강도와 인장강도, 압축강도와 탄성계수 상호간의 상관관계는 보통콘크리트와 비슷한 결과임을 알았다.

이상의 실험결과, 제조공정이나 입도조정을 거치지 않은 고로수쇄슬래그를 강모래의 일부로 대체하여 콘크리트용 잔골재로 사용하기 위해서는 개선해야 할 문제점 등이 있다고 생각되었다.

참 고 문 헌

1. 松下博通, 骨材としての高爐スラグセメントコンクリート化學とその應用, セメント協會, 昭和 62年 8 月.
2. 丸安陵和外 2名, 高爐セメントコンクリートの研究. 社團法人 土木學會, 콘크리트라이ブラリー 第 25號, 1979. 4.
3. 依田彰彦外 2名, 海水の作用を受けた高爐セメント 콘크리트について, セメント技術年報, No.30, 1976.
4. F. Keil, Slag Cement, Proceedings of 3rd International Symposium on the Chemistry of Cement. 1952.
5. Schroeder, F, Blast-furnace Slag and Slag Cement, Principal of Paper to V-ISCC.
6. 吉田彌智外 2名, 高爐水砕の利用に関する基礎的研究, セメント技術年報, No.34, 1980.
7. 依田彰彦, 高爐スラグを細骨材としたコンクリートの性質について, セメント技術年報, No.34, 1980.
8. 長瀧重義外 2名, 急冷スラグ砂の水和反應性とコンクリートの力學的 性狀, セメント技術年報, No.33,

- 1979.
9. 植田紳治, 高爐水砕を使用したコンクリートの緒性狀に関する研究. 第 1回 콘크리트工學年次講演論文集, 1975. 5.
10. 風砕砂等を用いたコンクリートに関する調査研究報告書, 日本材料學會, 昭和51年 10月.
11. 高爐スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計施工指針(案), 社團法人 土木學會, 1983. 2.
12. 高爐スラグ細骨材を用いたコンクリート施工指針・同解説, 社團法人 日本建築學會, 1983. 6.
13. 仕入豊和外 1名, 高爐水砕スラグを原料とする砕砂の研究. セメント・コンクリート. No.342, 1976. 8.
14. 長瀧重義, 高爐スラグ砕砂を用いたコンクリートの強度特性と體積變化, 財團法人 建材試驗センター. 1977. 3.
15. 早川宏一外 3名, 水砕砂を用いたコンクリートの諸性狀, セメント技術年報, No.33, 昭和54年.
16. 長瀧重義, 新しい骨材, 一高爐スラグ水砕砂一, 콘크리트 工學, Vol.16, 1978. 9.
17. 岸谷孝一, 콘크리트용 水砕スラグ細骨材の使用規準作成に関する研究, 第 1回 콘크리트工學年次講演會, 1979.
18. 沼田晋一, 高爐スラグ骨材, 콘크리트工學 Vol. 19, 1981. 5.
19. 長瀧重義, 沼田晋一, 高爐スラグ細骨材を用いた 콘크리트 物性, セメント・コンクリート. No.415, 1981. 9.
20. 依田彰彦 外 3名, 高爐水砕スラグ細骨材を用いた 콘크리트の調査表と基本的性質について. セメント技術年報, No.33, 昭和54年.
21. 長瀧重義 外 2名, 高爐水砕スラグを用いた 콘크리트의 諸性質について, 第 1回 콘크리트工學年次講演會. 1979.

(接受: 1992. 2. 18)