

고로급냉슬래그를 활용한 투수성 모르타르의 공학적 특성에 관한 기초연구

Engineering Characteristics of Permeable Mortar using Water-quenched Blast Furnace Slag as Fine Aggregates

글 | 方潤瓊* · 朴在魯**

(Bang, Yoon Kyung · Park, Jae Roh)

*토질및기초기술사, 공학박사, 대원과학대학 토목과 조교수.

E-mail: ykbang@daewon.ac.kr

**한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원.

E-mail: jrpark@kict.re.kr

목 차

1. 서 론
2. 실험개요 및 결과
3. 실험결과 고찰
4. 결론

Abstract

In this study, engineering characteristics of permeable mortar using water-quenched blast furnace slag as fine aggregates were analyzed by laboratory experiments to examine its suitability for permeable concrete pavement techniques. Engineering characteristics of mortar were investigated by performing both the compressive, flexural strength tests together with the constant head permeability tests for twenty-six types of mixing samples having different percentage of slag, cement and water. After

28days of curing, every performance was tested to find optimum mixture. When the goal coefficient of permeability was 10^{-2} cm/sec and flexural strength was $30\text{Kg}/\text{cm}^2$, we conclusion that the best mix design in permeable mortar was made in the condition, 60% of cement and 20% of water percentage of unit slag contents. From the present investigations, it is concluded that suitability for permeable concrete pavement techniques using water-quenched blast furnace slag as fine aggregates may possibly be used to achieve effects on strength together with drainage effects.

1. 서론

고로제철소에서 철광석 용해후 부산 되는 고로 급냉슬래그는(이하 급냉슬래그) 경량성, 다공성 및 자체경화성 등의 우수한 공학적 특성을 지닌 것으로 알려져있으며, 일본에서는 이를 시멘트원료, 기반개량재, 콘크리트 잔골재, 규산질비료, 응벽뒹채움재 및 철도의 투수성 노반재료 등 다양한 용도로 활용하고 있다.^{1,2)} 특히, 급냉슬래그는 형상이 불규칙하고 다공성재료이기 때문에 투수성이 매우 높으며, 일본의 경우 1978년 제정된 건조물 설계표준해설-토구조물³⁾에 슬래그를 잔골재로 활용한 투수성 강화노반에 대한 규정이 포함된 이래 20여년 전부터 철도노선에 이를 활용하고 있다.^{4,5)} 국내의 경우, 철광석을 원료로 사용하는 포항제철, 광양제철의 고로설비로부터 발생하는 슬래그는 1998년 현재 연간 약 815만톤에 달하는 것으로 추정되며, 이중 고압 살수처리에 의해 세립화한 급냉슬래그는 전체 발생슬래그 대비 약 43.1% 정도로 연간 약 351만톤 정도에 이르고 있고, 환경문제, 설비보호문제, 괴재슬래그의 처리문제 및 경제성 등으로 인해 추후 전체 고로슬래그에서 급냉슬래그가 차지하는 비율은 더욱 증가할 것으로 예상된다. 슬래그의 전체 발생량에서 급냉슬래그 발생량이 차지하는 비율은 슬래그의 수요와 깊은 관련이 있으며, 추후 국내에서도 슬래그의 전량 재활용을 위해서는 급냉슬래그의 건설재료로서의 대량이용에 관한 연구가 필수적이다.

본 연구에서는, 주차장, 자전거 이용시설, 보도, 공원이나 체육시설, 기타 주거시설 등 경하중이 작용하는 투수성 포장구조물이나 보차도용 블록 등의 제조에 적용 가능한 폐자원을 활용한 투수성 콘크리트 제조기술 개발을 위한 기초연구를 수행하였다. 이를 위해서 본 연구에서는, 일차적으로 고로제철소에서 철광석 용해후 부산 되는 급냉슬래그를

투수성 모르타르의 잔골재로 활용하기 위한 기초실험을 수행하였다. 실험에 사용한 급냉슬래그는 포항제철의 고로설비로부터 발생한 슬래그시료를 대상으로 하였으며, 급냉슬래그의 기본물성시험 및 급냉슬래그를 잔골재로 사용한 모르타르에 대한 일축압축강도시험, 휨강도시험 및 투수시험을 수행하였다. 급냉슬래그, 시멘트 및 물 등의 배합비를 다양하게 변화시켜, 이들 영향인자가 콘크리트의 일축압축강도, 휨강도 및 투수계수 등의 변화에 미치는 영향을 분석하였으며, 분석결과를 토대로, 급냉슬래그를 활용한 투수성 모르타르 제조시 강도와 투수계수값이 동시에 높게 나타날 수 있는 급냉슬래그-시멘트-물의 개략 배합비를 제시하였다.

2. 실험개요 및 결과

2.1 실험개요

본 연구에서는, 급냉슬래그의 기본 물성실험을 실시하였고, 급냉슬래그를 잔골재로 사용한 모르타르에 대한 일축압축강도시험, 휨강도시험 및 투수시험을 수행하였다. 실험에 사용한 급냉슬래그는 포항제철의 고로설비로부터 발생한 슬래그시료를 별도의 입도조정 없이 사용하였으며, 시험시료의 에이징 기간은 2개월 이내이다. 모르타르의 배합은, 슬래그:시멘트:물의 중량비를 다양하게 변화시켜 총 26개 배합의 모르타르로서 실시하였다. <Table 1>에는 본 연구에서 수행된 시험항목을 나타내었다.

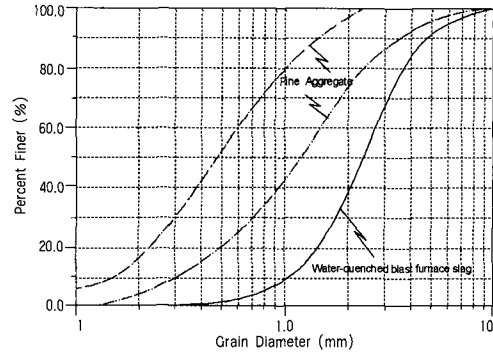
<Table 1> List of tests

	시 험 항 목	비 고
급냉슬래그	골재의 체가름시험	KS F 2502
	잔골재의 비중 및 흡수량시험	KS F 2504
	골재의 단위용적중량시험	KS F 2505
모르타르	모르타르의 압축강도시험	KS F 2405
	모르타르의 휨강도시험	KS F 2408
	흡수 투수계수시험	KS F 2322

모르타르의 배합은 기계식 믹서를 사용하여 균일하게 혼합하였으며, 공시체는 성형 1일후 탈형하여 21°C의 항온 수조에서 28일간 수중 양생하였다. 일축압축시험은 $\phi 10 \times 20$ cm의 원주형 몰드에 모르타르를 3층으로 채우고 $\phi 16$ mm 다짐봉을 이용하여 각층을 25회씩 다졌으며, 휨강도 시험용 몰드는 $15 \times 15 \times 55$ cm 공시체를 제작하여 중앙점하중법에 의해 시험을 실시하였다. 참고적으로, 추후 굵은 골재를 혼합하여 급냉슬래그를 잔골재로 사용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 연구를 계속적으로 추진할 계획이므로, 실험방법의 일관성을 감안하여 시험공시체 및 방법을 콘크리트 시험에 준하여 실시하였다. 시험은 대기중에서 약 1~2시간 정도 건조시켜 공시체 표면수가 제거된 상태에서 진행하였다. 모르타르 공시체에 대한 실내투수시험은, 모르타르 공시체의 투수계수가 매우 큰 점을 감안하여, 흙의 투수계수시험 방법(KS F 2322)을 토대로 정수위투수시험에 의해 수행하였다. 투수시험용 몰드는 10×20 cm 크기의 PVC 재질로 제작하여 사용하였으며, 26개 배합비의 모르타르를 몰드에 8cm 높이로 채우고 다짐막대를 사용하여 다짐 후 28일간 수중 양생하였다.

2.2 급냉슬래그의 기본물성시험 결과

본 연구에서 사용된 급냉슬래그에 대한 기본물성시험 결과 조립율은 3.4로서, 일반적인 가골재의 조립율 범위⁹⁾인 2.3~3.1을 약간 상회하는 것으로 나타났으며, 비중 2.18, 단위중량은 $1,013 \text{Kg/cm}^3$ 로 경질에 해당하며, 경량재료로 나타났다. 또한, 흡수율은 4.7%로, 일반 잔골재에 비하여 크게 나타났다. 시험에 사용된 급냉슬래그의 입도는 균등한 모래입경으로, 체분석 결과 나타난 입도분포곡선은 <Fig 1>과 같다.



<Fig 1> Particle size distribution curve for water-quenched blast furnace slag

<Table 2> Summary of test results

공시체 번호	압축강도 (kg/cm ²)	휨강도 (kg/cm ²)	투수계수 (cm/sec)	배합비* (슬래그:시멘트:물)
1	37.19	7.47	5.32×10^{-1}	100 : 17.5 : 15
2	43.21	7.99	1.09×10^{-1}	100 : 17.5 : 20
3	44.84	8.10	3.30×10^{-3}	100 : 17.5 : 25
4	57.32	9.15	8.21×10^{-4}	100 : 17.5 : 30
5	38.21	7.49	3.36×10^{-1}	100 : 20.0 : 15
6	48.40	8.04	8.74×10^{-2}	100 : 20.0 : 20
7	60.44	9.25	2.31×10^{-3}	100 : 20.0 : 25
8	98.65	11.55	5.54×10^{-4}	100 : 20.0 : 30
9	51.20	12.23	3.09×10^{-1}	100 : 30.0 : 15
10	76.18	14.92	6.89×10^{-2}	100 : 30.0 : 20
11	132.48	16.09	-	100 : 30.0 : 25
12	204.14	30.02	-	100 : 30.0 : 30
13	70.83	14.30	1.14×10^{-1}	100 : 40.0 : 15
14	110.21	16.10	4.14×10^{-2}	100 : 40.0 : 20
15	160.17	25.48	-	100 : 40.0 : 25
16	240.06	34.79	-	100 : 40.0 : 30
17	85.79	15.19	8.70×10^{-2}	100 : 50.0 : 15
18	118.91	19.82	2.91×10^{-2}	100 : 50.0 : 20
19	221.85	35.10	-	100 : 50.0 : 25
20	289.37	46.00	-	100 : 50.0 : 30
21	140.38	20.01	3.24×10^{-2}	100 : 60.0 : 15
22	183.22	32.38	1.80×10^{-2}	100 : 60.0 : 20
23	290.92	44.65	-	100 : 60.0 : 25
24	378.47	65.25	-	100 : 60.0 : 30
25	250.01	26.04	7.04×10^{-3}	100 : 70 : 15
26	261.92	47.10	5.12×10^{-3}	100 : 70 : 20

* : 중량배합

2.3 모르타르의 공학적 특성실험 결과

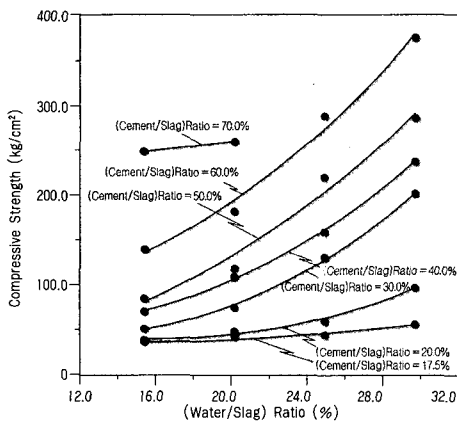
본 연구에서는 슬래그에 시멘트와 물의 배합비율을 각각 7종류, 4종류로 변화시킨 총 26가지 배합의 모르타르를 대상으로 압축강도, 휨강도 및 정수위투수시험에 의한 투수계수를 측정하였으며, 실험결과를 <Table 2>에 정리하였다.

3. 실험결과 고찰

3.1 압축강도에 미치는 시멘트 및 물 배합비의 영향

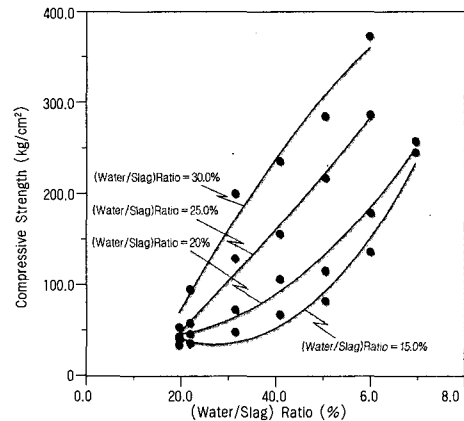
<Fig 2> 및 <Fig 3>에는, 시멘트 및 물의 첨가량이 모르타르의 압축강도에 미치는 영향을 알아보기 위해, 시멘트 배합비에 따른 압축강도-물 배합비 관계 및 물 배합비에 따른 압축강도-시멘트 배합비 관계를 나타내었다.

시험공시체의 압축강도는 시멘트 및 물 배합비에 따라 최대 약 378.5Kg/cm²(공시체번호 24, Table 2. 참조)~37.2Kg/cm²(공시체번호 1)의 범위로 나타났으며, 그 크기는 시멘트 및 물 배합비가 증가할수록 증가하였다. 이러한 결과는, 일반적인 콘크리트에 있어서 골재 치수가 클수록, 또한 물-시멘트비가 작을수록 재료의 강도가 증



<Fig 2> Relationship between compressive strength and water contents for various cement replacements

가하지만, 콘크리트중의 공극이 많은 경우에는 오히려 물-시멘트비가 큰 배합이 내부공극이 적어 지므로 강도가 더 높게 나타난다는 기존의 연구결과⁷⁾와도 부합되는 결과이다.

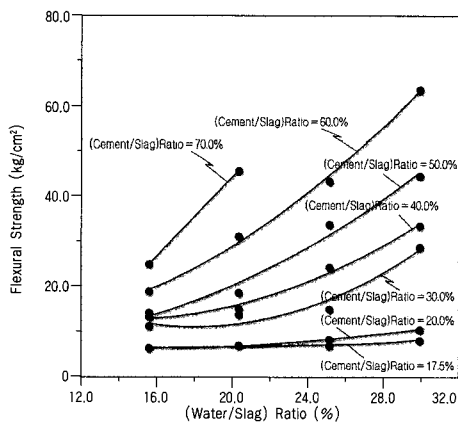


<Fig 3> Relationship between compressive strength and cement contents for various water replacements

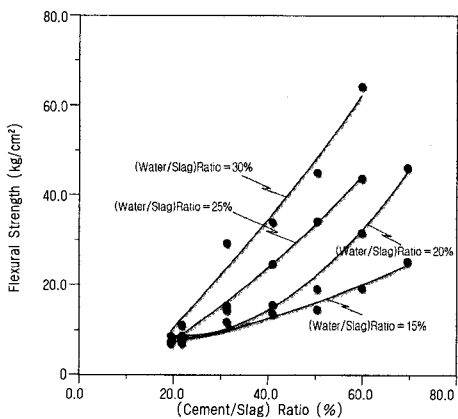
3.2 휨강도에 미치는 시멘트 및 물 배합비의 영향

<Fig 4> 및 <Fig 5>에는, 시멘트 및 물의 첨가량이 휨강도에 미치는 영향을 알아보기 위해, 시멘트 배합비에 따른 휨강도-물 배합비 관계 및 물 배합비에 따른 휨강도-시멘트 배합비 관계를 나타내었다. 시험결과 나타난 공시체의 휨강도는 시멘트 및 물 배합비에 따라 최대 약 65.3Kg/cm²(공시체번호 24)~7.5Kg/cm²(공시체번호 1)의 범위로, 대체적으로 압축강도의 크기에 비례하는 것으로 나타났다. 휨강도의 크기는 압축강도의 경우와 마찬가지로 시멘트 및 물 배합비가 증가할수록 증가하였으며, 시멘트 및 물 배합비에 따른 휨강도의 변화양상은 압축강도의 경우와 거의 유사한 것으로 나타났다. 전술하였듯이 본 연구는, 경하중이 작용하는 투수성 포장구조물이나 보차도용 블록 등의 제조에 적용 가능한 투수성 콘크리트 제조기술 개발을 위한 기초연구에 해당되며,

추후 굵은 골재를 혼합한 이른바 급냉슬래그를 잔 골재로 사용하는 투수성콘크리트에 관련된 연구를 진행할 예정이다. 따라서, 자전거 이용시설 정비기준⁸⁾에서 제시된 투수성콘크리트의 강도기준과 비교하여 분석하였다. 본 연구결과, 공시체 12, 16, 19, 20, 22, 24, 26의 경우에는, 자전거 이용시설 정비기준⁸⁾에 제시된 자전거도로용 투수콘크리트의 강도 및 투수성 기준을 만족하는 것으로 나타나, 투수성 콘크리트의 기존 골재의 대체소재로서 급냉슬래그의 활용가능성을 확인할 수 있다.



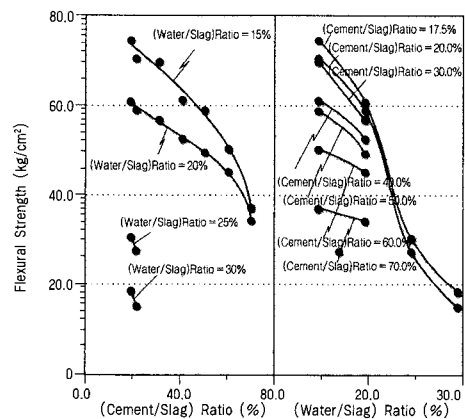
〈Fig 4〉 Relationship between flexural strength and water contents for various cement replacements



〈Fig 5〉 Relationship between flexural strength and cement contents for various water replacements

3.3 투수계수에 미치는 시멘트 및 물 배합비의 영향

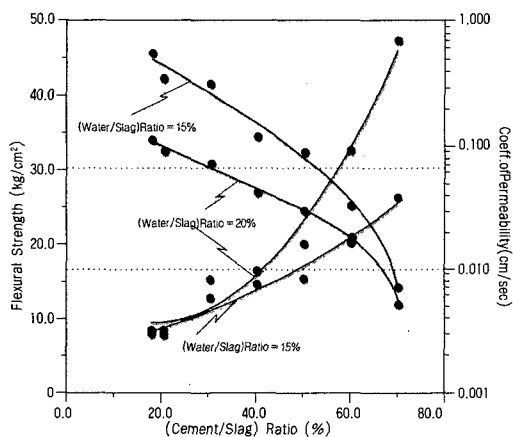
〈Fig 6〉에는 시멘트와 물의 배합비에 따른 시험공시체의 투수계수 변화를 나타내었다. 시험공시체에 대한 정수위투수시험 결과, 시멘트 및 물의 배합비가 증가할수록 투수계수는 저하되는 것으로 나타났으며, 물/슬래그비가 투수계수에 미치는 영향은 시멘트/슬래그비가 투수계수에 미치는 영향보다 다소 큰 것으로 나타났다. 이는 압축강도 및 휨강도의 크기가 증가할수록 투수계수가 감소하는 것을 의미하며, 시험공시체의 밀실정도가 클수록 강도는 증가하는 반면 투수성은 저하되는 일반적인 현상⁹⁾으로 이해할 수 있다. 따라서 소요의 강도와 투수성을 만족하기 위해서는 적정배합비를 도출하는 것이 필요하게 된다. 자전거 이용시설 정비기준⁸⁾에 제시된 자전거도로용 투수콘크리트의 투수계수는 10^{-2} cm/sec 이상으로, 물/슬래그비 25%, 30%의 경우에는 모든 배합비에 대해서 허용기준을 만족시키지 못하고 있으며, 물/슬래그비 15%, 20%인 경우에는 시멘트/슬래그비 70%인 경우를 제외한 모든 배합비에 대해서 허용기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다.



〈Fig 6〉 Relationship between coefficient of permeability and cement contents, water contents

3.4 시멘트 배합비에 따른 휨강도, 투수계수 변화

〈Fig 7〉에는 강도와 투수계수값이 모두 높게 나타나는 최적의 배합비 범위를 알아보기 위해 시멘트 배합비에 따른 시험공시체의 휨강도 및 투수계수변화를 나타내었다. 〈Fig 6〉으로부터, 물/슬래그비가 25%, 30%인 경우에는 자전거 이용시설 정비기준⁸⁾ 투수계수 10^{-2} cm/sec를 만족하지 못하여, 〈Fig 7〉에는 물/슬래그 배합비가 15%, 20%인 경우만을 표시하였다. 〈Fig 7〉로부터, 시멘트/슬래그비가 증가할수록 투수계수는 감소하는 경향을, 휨강도는 증가하는 경향을 나타내어, 〈Fig 6〉의 분석과 동일한 결과, 즉 공시체의 강도와 투수성이 반비례관계에 있음을 알 수 있다. 그림으로부터, 휨강도기준 30Kg/cm^2 (가는 점선으로 표시)이상을 만족하는 배합비는 물/슬래그비 20%이고, 시멘트/슬래그비는 60%와 70% 두 가지 경우임을 알 수 있으며, 투수계수 10^{-2} cm/sec(굵은 점선으로 표시)이상을 만족하는 경우는 시멘트/슬래그비 70%인 경우를 제외한 모든 배합비가 이에 해당함을 알 수 있다. 따라서 결과적으로, 슬래그:시멘트:물의 중량배합



〈Fig 7〉 Relationship between coefficient of permeability and compressive, flexural strength

비 100:60:20 인 모르타르 공시체의 경우에는, 자전거 이용시설 정비기준⁸⁾에 제시된 자전거도로용 투수콘크리트의 강도 및 투수성 기준을 만족하는 것으로 나타나, 투수성 콘크리트의 기존 골재의 대체소재로서 급냉슬래그의 활용가능성을 확인할 수 있다.

4. 결론

- (1) 급냉슬래그는 경량성, 잠재수경성 등의 우수한 공학적 특성을 지니고 있을 뿐 아니라 그 형상이 불규칙하고 다공성재료이기 때문에, 투수성 콘크리트의 기존 골재의 대체소재로 충분히 사용이 가능할 것으로 판단된다.
- (2) 급냉슬래그를 잔골재로 사용한 시험공시체에 대한 압축 및 휨강도시험 결과, 압축강도는 약 $378.5\text{Kg/cm}^2 \sim 37.2\text{Kg/cm}^2$ 의 범위로, 휨강도는 약 $65.3\text{Kg/cm}^2 \sim 7.5\text{Kg/cm}^2$ 의 범위로 각각 나타났으며, 시멘트 및 물의 배합비가 증가할수록 강도도 증가하는 반면, 투수성은 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 슬래그:시멘트:물의 중량배합비 100:60:20 (Table 3., 공시체번호 22)인 모르타르 공시체의 경우에는, 자전거 이용시설 정비기준⁸⁾에 제시된 자전거도로용 투수콘크리트의 강도 및 투수성 기준을 만족하는 것으로 나타나, 투수성 콘크리트의 기존 골재의 대체소재로서 급냉슬래그의 활용가능성을 확인할 수 있다.
- (4) 본 연구는, 경하중이 작용하는 투수성 포

장구조물이나 보차도용 블록 등의 제조에 적용 가능한 투수성 콘크리트 제조기술 개발을 위한 기초연구에 해당되며, 추후 굵은 골재를 혼합한 이른바 급냉슬래그를 잔 골재로 사용하는 투수성콘크리트에 관련된 연구를 진행할 예정이다.

트의 장기적인 투수특성을 포함한 시간경과에 따른 역학적 제반특성 규명, 겨울철 동결에 따른 영향분석, 침출수 수질특성의 규명 및 급냉슬래그의 조달방법에 따른 경제성 분석, 나아가 종합적 포장공정 및 시방기준의 제시 등은 추후의 연구과제이다.

(원고 접수일 2000. 4. 28)

(5) 또한, 급냉슬래그를 사용한 투수성콘크리

참고문헌

1. 김영진, "제철소 산업폐기물 슬래그의 특성 및 활용", 건설기술정보 8월호(1992).
2. 片協 清士, "新しい土木材料とその展開", ニュコンストラクションシリーズ, 第10巻, 山海堂, pp.166~172(1995).
3. 日本鐵道施設協會, 建造物設計標準解説土構造物, Vol. 10, pp.205~207(1978).
4. 須長 誠, 關根悅夫, "鐵道強化路盤厚さの低減に關する研究", 土木學會論文集, No. 498, VI-24, pp.57~66(1994).
5. 須長 誠, 關根悅夫, "經濟的な強化路盤の開発に關する研究", RTRI Report, Vol. 5, No. 10, pp.25~33(1991).
6. 금호건설기술연구소, 철도 강화노반재료 및 지지력강화 공법개발, 연구보고서 금호기연97-R02 (1997).
7. 채장우, 정문영, 이형우, "투수콘크리트의 물리적 특성에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집 제 11권 1호, pp.166~171(1999).
8. 내무부, 자전거 이용시설 정비기준, pp.103~115(1997).
9. 문한영, 김성수, 정호섭, "투수성 콘크리트포장의 실용화를 위한 실험적 연구", 콘크리트학회지 제10권 3호, pp.165~173(1998).