

흙도로포장용 재료로서 폐콘크리트 미분말의 활용성 연구

Utilizability of Waste Concrete Powder as a Material for Soil Pavement

김용직^{1*} · 최연왕² · 김영진³

Yong-Jic Kim^{1*} · Yun-Wang Choi² · Young-Jin Kim³

(Received September 20, 2015 / Revised September 25, 2015 / Accepted September 25, 2015)

This study is conducted to utilize waste concrete powder (WCP) made as a by-product manufacturing high quality recycled aggregate. The blaine fineness of the used waste concrete powder was $928\text{m}^2/\text{g}$. As the main characteristic of waste concrete powder, it showed an angular type similar to cement, but hydrated products were attached on the surface of particles. In addition, the size of the particles of waste concrete powder was larger than OPC and in terms of chemical components it had higher SiO_2 contents. For using WCP in soil cement-based pavement, the qualities, physical and chemical properties, of WCP should be researched. In the first step, the specified compressive strength of mortar for two types of clay sand soil and clay soil respectively was experimented to be 15 MPa and then optimum mixing ratio of chemical solidification agent were decided in the range of 1.5 - 3.0% in the replacement with cement weight content. In the second step, based on the prior experimental results, recycling possibility of WCP in soil cement-based pavement was studied. In the result of experiment the mixing ratio of WCP were 5, 10, 15 and 20% in the replacement with soil weight and the compressive strength of mortar was somewhat decreased according to the increase of the mixing ratio of WCP.

키워드 : 폐콘크리트 미분말, 재생골재, 분말도, 포장

Keywords : Waste concrete powder, Recycled aggregate, Blaine fineness, Pavement

1. 서론

최근 경제발전으로 힘입어 생활수준이 크게 향상됨으로써 이로 인하여 발생하는 쓰레기, 생활 및 산업 폐기물이 크게 증가하여 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 특히, 산업 폐기물 중 건설폐기물은 콘크리트구조물의 노후화, 성능저하 및 용도, 목적의 변경 등으로 인하여 점차 증가되고 있는 실정이다.

이러한 건설폐기물 중 약 65%를 차지하고 있는 폐콘크리트는 현재까지 국내의 경우 단순히 성토나 매립용 재료로 90% 이상 주로 사용 내지는 폐기되어 왔을 뿐, 도로 기층이나 콘크리트 레미콘 용 등의 부가가치가 높은 자원으로서 재활용되지 못하고 있으며, 더구나 이러한 건설폐기물을 처리할 수 있는 매립지의 절대 부족

에 따른 폐기물의 처리비용 상승이 큰 부담이 되고 있다(Ahmad 2003; Berndt 2009). 폐콘크리트를 이용한 재생골재를 보다 부가가치가 높은 도로 기층용이나 콘크리트용과 같이 천연골재와 대체하여 사용할 수 있는 고품질의 재생골재를 생산하기 위해서는 파쇄 및 처리 과정이 여러 번인 정밀한 제조 기술이 필요하다. 이러한 제조 기술로 생산된 재생골재는 표면에 부착된 모르타르를 최대한 제거할 수 있어 고품질의 재생골재를 생산할 수 있다(Kim 2012; Moon 2002). 그러나 이러한 제조 기술은 재생골재 자체의 품질을 향상시킬 수 있지만, 제조원가 상승 및 폐콘크리트 분말의 발생량을 크게 증가시키는 문제점이 있다. 현재로서는 이때 발생하는 폐콘크리트 분말을 전량 점토와 혼합하여 단순 매립하고 있다. 그러나 최근 들어서 매립지 확보의 어려움과 토양 및 지하수 오염등과

* Corresponding author E-mail: yongjic.kim@daewooenc.com

¹(주) 대우건설 기술연구원 토목연구팀 (Daewoo E&C, Civil Engineering Research Team, Gyeonggi, 440-800, Korea)

²세명대학교 토목공학과 (Semyung University, Department of Civil Engineering, Chungbuk, 390-711, Korea)

³(주) 대우건설 기술연구원 (Daewoo E&C, Institute of Construction Technology, Gyeonggi, 440-800, Korea)

같은 환경적인 측면이 문제점으로 지적되고 있다(Jiusu 2009).

이러한 문제점을 해결하기 위해서 몇몇 연구자들은 페콘크리트 분말을 콘크리트용 혼화재료, 지반 개량재 및 담체 등으로 적용하는 연구를 수행하고 있다(Tsung 2006).

한편, 현재까지 국내의 도로포장은 대부분이 표층에 불투수층인 아스팔트 및 시멘트 콘크리트를 사용한 포장으로 노상과 표층이 차단됨에 따라 노상의 흙은 점진적으로 산성화가 진행되고 이에 따라 영양물질이 부족하여 미생물이 서식하지 못하게 될 뿐만 아니라 토양의 건조화가 진행되어 여러 가지 환경문제가 발생하고 있는 실정이다. 따라서 표층재료를 자연상태의 흙을 사용한 흙포장 도로는 기존의 아스팔트 및 시멘트 콘크리트 포장과는 다르게 흙, 무기질계 특수혼화재료, 골재, 혼합수를 최적배합으로 하여 중·저강도 구조물이다. 또한, 공법개선을 통하여 포장단면 변화를 조절함으로써 경제적으로 시공이 가능하며, 자연상태의 흙을 주원료함으로써 친환경적이며, 주변환경과 조화를 이룰 수 있는 포장이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 페콘크리트 분말을 흙도로포장용 충전재료로서 사용하기 위한 가능성을 검토하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 결합재의 품질

시멘트는 밀도 3.15g/cm³인 보통포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며, 고로슬래그 미분말(GGBF)은 밀도 2.90g/cm³, 페콘크리트 미분말(WCP)은 밀도 2.48g/cm³인 것을 사용하였다. Table 1은 시멘트 및 결합재의 화학성분 및 물리적 성질을 정리한 것이다.

2.1.2 고화제 및 토양의 품질

고화제는 석고 및 아원 성분으로 구성된 Road Compound(RC)와 탄산소다 및 알루미늄실페이트로 제조된 New Road Compound(NRC)를 사용하였다. 또한, 본 실험에 사용된 대상토는 최대건조 밀도 2.014g/cm³ 및 최적함수비 17%인 사질토를 사용하였다. Table 2는 고화제 및 사질토의 화학성분을 정리한 것이다.

2.2 실험방법

2.2.1 미세구조분석

OPC에 RC 또는 NRC를 혼합한 시멘트 페이스트를 분쇄하여 150 μ m 체에 통과시켜 채취한 시료에 대하여 RINT D/max 2500

Table 1. Chemical components and physical properties of OPC and WCP

Items	OPC*	GGBF**	WCP***
SiO ₂ (%)	21.95	34.3	58.6
Al ₂ O ₃ (%)	6.59	15.8	10.4
Fe ₂ O ₃ (%)	2.81	0.1	4.6
CaO (%)	60.10	42.2	11.8
MgO (%)	3.32	6.8	1.2
SO ₃ (%)	2.11	0.2	0.4
Density (g/cm ³)	3.15	2.90	2.48
Blaine Fineness (cm ² /g)	3,112	4,380	948

* OPC : Ordinary Portland Cement

** GGBF: Ground Granulated Blast-Furnace Slag

*** WCP : Waste Concrete Powder

Table 2. Chemical components of hardening agent

Items	RC*	NRC**	Sandy
SiO ₂ (%)	8.5	5.3	65.7
Al ₂ O ₃ (%)	15.2	33.0	17.9
Fe ₂ O ₃ (%)	1.4	1.0	2.1
CaO (%)	39.7	12.0	0.3
MgO (%)	1.1	1.0	0.5
Na ₂ O (%)	0.1	5.0	0.4
SO ₃ (%)	33.4	42.2	-
K ₂ O (%)	-	-	5.2
Ig. Loss	0.6	0.5	7.7

* RC : Road Compound

** NRC: New Road Compound

(Rigaku)으로써 X선회절분석을 실시하였으며, 측정조건은 CuK α (Ni filter): 30kV, 20mA, Scanning speed: 2°/min, Full scale 7000 cps, 2 θ : 5°~40°로 정하였다. OPC에 RC 또는 NRC를 혼합한 시멘트페이스트의 초기 재령 3 및 7일에서 어떠한 수화생성물이 관찰되는지 알아보기 위하여 10,000 배로 확대하여 주사전자현미경(SEM)으로 촬영하였다.

2.2.2 역학적 성능 검토

압축강도용 공시체는 KS L 5105에 의하여 시멘트, 사질토, 혼합수 및 RC 또는 NRC를 혼합하여 50 × 50 × 50mm인 입방체 물드를 사용하여 강제 다짐봉에 의해 다짐의 횟수를 균일하게 한 후 2층 다짐을 실시하여 공시체를 제작하였다. 압축강도 측정은 KS F 2514에 의하여 측정하였다.

2.2.3 배합

사질토에 대한 Road Compound의 적정 혼합률 및 최적함수비 결정을 위한 배합은 사전 배합에서 얻어진 결과를 분석하여 사질

Table 3. Mixture proportions of mortar (I)

MC* (%)	(OPC+RC)/Soil (%)	RC/(OPC+RC) (%)	Unit mass (kg/m ³)			
			W	OPC	RC	Soil
0	30	20	197	440	110	1,950
15			285	440	110	
20			373	440	110	
35			461	440	110	

* MC : Moisture Content (%)

Table 4. Mixture proportions of mortar (II)

(OPC+NRC)/Soil (%)	NRC/(OPC+NRC) (%)	Unit mass (kg/m ³)			
		W	OPC	NRC	Soil
10	1.5	302	198	2.97	2,014
15			298	4.54	
10	3.0		195	6.04	
15			293	9.06	
10	4.5		192	9.06	
15			299	13.6	
10	6.0		189	12.08	
15			284	18.12	

토에 대한 함수비 혼합물 4수준(10%, 15%, 20%, 25%), 사질토에 대한 Road Compound의 혼합물 30%, Road Compound에 대한 RC 혼합물(20%, 30%)으로 변화시켜 제조하였다. 배합표는 Table 3과 같다. Table 4는 흙도로포장에서 가장 큰 비용을 차지하는 NRC의 혼합률을 경제성 측면을 고려함으로써 최적의 NRC 혼합률을 결정하기 위하여 NRC/OPC+NRC를 4수준(1.5, 3, 4.5, 6%)으로 혼합률을 변동하여 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세구조분석

고화재 RC 및 NRC가 시멘트 및 혼합수와 반응하여 어떤 수화 생성물을 생성하는지 알아보기 위하여 보통포틀랜드시멘트(OPC)와 OPC에 RC 또는 NRC를 각각 혼합한 시멘트 페이스트를 분쇄하여 150 μ m 체에 통과시켜 채취한 시료에 대하여 재령별로 X선 회절 분석을 실시한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 재령 및 고화재 종류에 관계없이 에트링가이트(E), 포틀랜드아이트(P), 및 칼사이트(C) 등이 관찰되었다. 특히, OPC+RC를 혼합한 시멘트 페이스트의 경우 에트링가이트(E)가 다른 페이스트의 경우보다 크게 나타나는 경향을 보였다. 이러한 원인은 RC에 들어 있는 아원 및

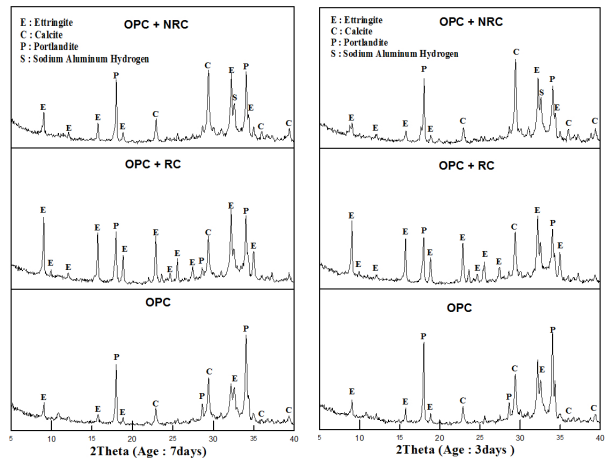


Fig. 1. X-ray diffraction of paste

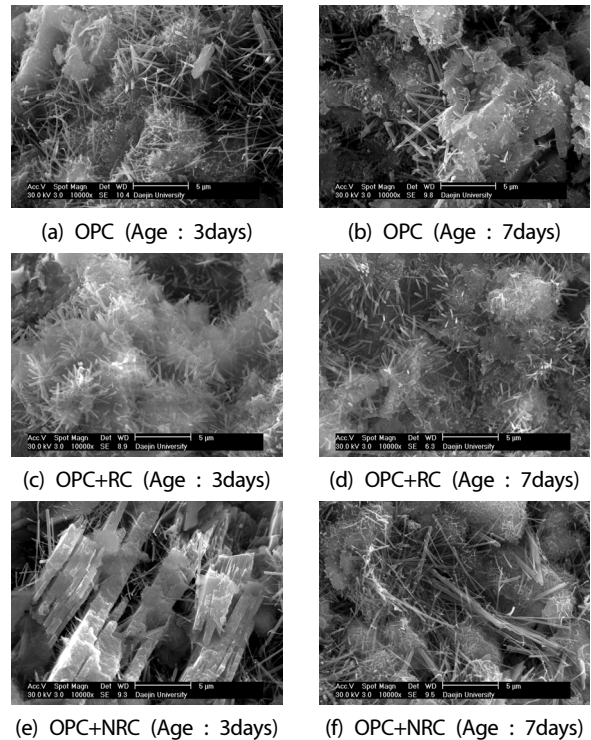


Fig. 2. SEM of paste

무수석고와 같은 팽창제 성분이 초기에 물과 반응하여 많은 양의 에트링가이트를 생성하였기 때문에 판단되며 침상구조의 에트링가이트가 흙 내부의 큰 공극을 채워줌으로써 흙입자 사이의 충분한 결합력을 발현하게 되는 것으로 판단된다. 또한, 경제성을 고려하여 RC의 대체 고화재로 사용하고자 하는 NRC를 혼합한 OPC+NRC의 경우에는 OPC+RC를 혼합한 경우와 마찬가지로 강도를 발현시킬 수 있는 에트링가이트 및 포틀랜드아이트를 생성하는

것을 알 수 있었다. Fig. 2는 각 재령별로 보통포틀랜드시멘트(OPC), OPC에 RC 및 NRC를 각각 혼합한 페이스트의 SEM사진을 나타낸 것이다. 고화재를 혼합하지 않은 시멘트페이스트의 경우 재령 3일에서는 에트리נג가이트가 선명하게 나타나고 있지만, 재령 7일에서는 수산화칼슘이 성장하여 대부분을 차지하고 있었다. 한편, OPC+RC의 경우 재령에 관계없이 침상구조인 에트리נג가이트가 대부분을 차지하고 있으며, OPC+NRC의 경우에는 재령 3일에서 판상의 NAH(Sodium-Aluminate-Hydrogen)로 추정되는 물질이 형성됨을 알 수 있었다.

3.2 압축강도 특성

사질토에 Road Compound의 혼합률 30%, RC 혼합률 20%로 고정하고 강도특성을 고려한 최적의 함수비를 결정하기 위하여 함수비 혼합률 4수준(10%, 15%, 20%, 25%)으로 변화시킨 공시체를 제조하였다. 제조한 공시체의 재령 3일, 7일 및 28일의 압축강도를 측정고 함수비 변화에 따른 압축강도 값을 나타낸 것이 Fig. 3이다. Fig. 3의 결과 사질토는 함수비 20%에서 재령 28일의 강도가 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 초기재령인 3일 및 7일에서 함수비 변화에 따른 강도차이는 크지 않으며, 재령 28일의 함수비 20%에서 강도를 기준으로 할 경우 함수비 15%에서는 약 10% 압축강도가 다소 감소되었지만, 함수비 25%에서는 약 22%로 압축강도가 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 시험에 사용한 사질토의 최적함수비(OMC)가 17%로 Road Compound를

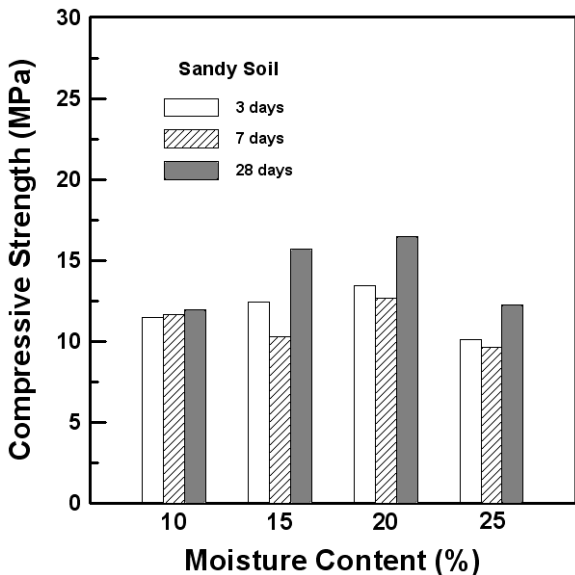


Fig. 3. Compressive strength according to moisture content

사용한 사질토의 강도가 가장 크게 증가된 함수비 20%와 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있어 사질토에 Road Compound를 사용시 강도특성을 고려한 최적의 함수비는 사용 사질토의 최적함수비(OMC) 또는 최적함수비(OMC)보다 함수비를 1~3% 정도 다소 증가시킨 함수비로 결정하는 것이 적당하다고 판단된다. Fig. 4 및 5는 NRC의 최적 혼합률을 알아보기 위해 정리한 것이다. 사전의 실험결과를 바탕으로 최적의 함수비 15%, 흙대비 시멘트량 10 및 15% 각각에 대하여 시멘트 대비 NRC 혼합률을 0, 1.5, 3.0,

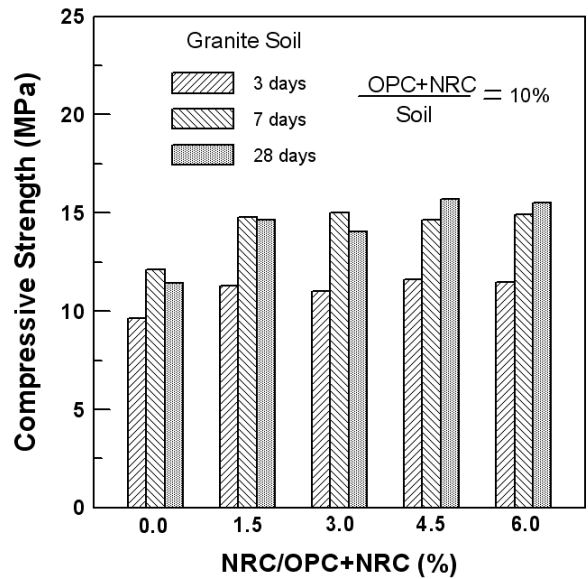


Fig. 4. Compressive strength according to NRC (10%)

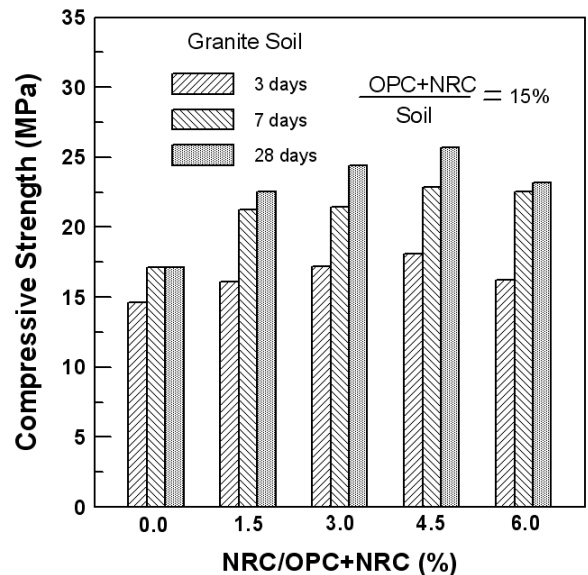


Fig. 5. Compressive strength according to NRC (15%)

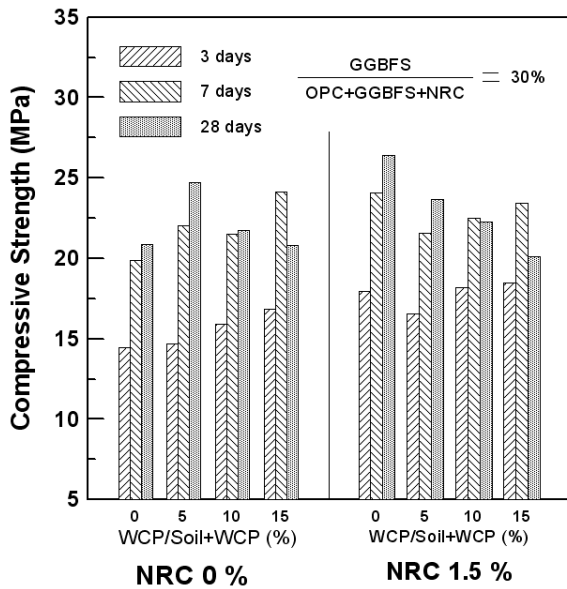


Fig. 6. Compressive strength according to WCP

4.5 및 6.0% 5단계로 혼합하여 모르타르의 압축강도를 재령 3, 7 및 28일에 대하여 나타낸 것이 Fig. 4 및 5이다. Fig. 4 및 5에서 알 수 있듯이 재령 및 NRC 혼합률에 관계없이 OPC+NRC/Soil이 10 및 15% 모든 경우에 압축강도 15MPa를 상회하는 결과를 얻었다. 특히, 시멘트량이 15%인 경우에는 시멘트의 혼합률이 증가함에 따라 시멘트의 수화반응이 활발하게 일어나 비교적 높은 압축강도를 얻었다. 반면에 NRC의 혼합률이 증가에 따라 압축강도의 증가가 비례하여 증가하는 것이 아니기 때문에 목표로 하는 적당한 강도 및 경제성을 고려하여 NRC/OPC+NRC 가 1.5 및 3.0%를 혼합하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 고로슬래그미분말을 0, 15, 30 및 45% 혼합하여 실험한 결과를 고려하여 고로슬래그미분말을 30%로 고정된 후 폐콘크리트분말을 흙 대체 0~15%까지 5%씩 증가하여 실험한 결과를 나타낸 것이 Fig. 6이다. Fig. 6에서 폐콘크리트분말의 혼합률에 관계없이 NRC의 혼합률 0 및 1.5%에 대하여 압축강도 15MPa를 상회하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 폐콘크리트분말의 최대 혼합률을 15%까지 혼합하여 사용하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 사질토의 최적함수비(OMC) 전후로 함수비(MC)를 변화시켜 실험한 결과 최적함수비를 약간 상회하는 15~20%에서 가장 좋

- 은 압축강도가 나타남을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 흙포장도로에 사용된 고화제인 Road Compound(RC) 대체 재료로서 New Road Compound(NRC)가 충분히 가능함을 확인하였다.
2. New Road Compound에 의한 사질토의 최적함수비(OMC) 전후로 함수비(MC)를 변화시켜 실험한 결과, 최적함수비를 약간 상회하는 혼합률에서 가장 좋은 압축강도가 나타남을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 흙포장도로에 사용된 고화제인 Road Compound 대체 재료로서 New Road Compound가 충분히 가능함을 확인하였다.
3. New Road Compound를 혼합한 경우, 경제성을 고려하여 시멘트에 고로슬래그미분말을 0, 15, 30 및 45% 4단계로 대체하여 실험한 결과 최적의 혼합률이 30%로 나타났으며, 폐콘크리트분말의 경우 흙에 대하여 최대 15%까지 혼합하여 사용해도 충분히 목표강도를 확보할 수 있었다.

이상의 연구결과를 통하여 개발된 Road Compound 및 New Road Compound로써 표층흙을 고화시킬 목적으로 사용할 경우 압축강도를 5MPa에서 최대 29MPa정도까지 발현시킬 수 있으므로 흙포장 도로의 사용목적에 따라 즉 압축강도가 12~15MPa 범위에서는 보도 및 자전거도로용, 15~18MPa 범위에서는 경교통로 및 주차장용, 18~25MPa 범위에서는 일반도로용으로 사용이 가능할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, Road Compound 및 New Road Compound의 혼합률을 조정하면 지반개량공사에 있어 연약지반 개량 및 안정처리용 등으로 폭 넓게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(11기술혁신 F04-탄소저감형연구단)에 의해 수행되었습니다.

References

Ahmad, S., Aimin, X. (2003). Performance and Properties of Structural Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate, *ACI Materials Journal*, **100-M42**, 371-380.

Berndt, M.L. (2009). Properties of Sustainable Concrete Containing Fly Ash, Slag and Recycled Concrete Aggregate, *Journal of Construction and Building Materials*, **23**, 2606-2613.

Kim, Y.J., Choi, Y.W. (2012). Utilization of Waste Concrete Powder as a Substitution Material for Cement, *Journal of*

- Construction and Building Materials, **30**, 500–504.
- Kim, Y.J., Kim, Y.J. (2012). Utilization of Waste Powder as a Substitution Material for Cement, Proceeding of Korea Concrete Institute, **24(1)**, 161–162 [in Korean].
- Moon, D.J., Moon, H.Y. (2002). Evaluation on Qualities of Recycled Aggregate and Strength Properties on Recycled Aggregate Concrete, Journal of Korean Society of Civil Engineers, **22(1-A)**, 141–150 [in Korean].
- Jiusu, L., Hanning, X., Yong, Z. (2009). Influence of Coating Recycled Aggregate Surface With Pozzolanic Powder on Properties of Recycled Aggregate Concrete, Journal of Construction and Building Materials, **23**, 1287–1291.
- Tsung, Y.T., Yuen, Y.C., Chao, L.H. (2006). Properties of HPC with Recycled Aggregates, Journal of Cement and Concrete Research, **36**, 943–950.

흙도로포장용 재료로서 폐콘크리트 미분말의 활용성 연구

본 연구는 고품질의 재생골재 제조시 발생하는 폐콘크리트 미분말을 콘크리트용 혼화재로 활용하기 위한 연구이며, 분말도는 $928\text{cm}^2/\text{g}$ 인 폐콘크리트 미분말에 대하여 검토하였다. 폐콘크리트 분말의 주요 특징은 시멘트와 유사한 각진 입형을 나타내고 있었으나 입자 표면에 수화생성물들이 부착되어 있었다. 또한 시멘트와 비교하여 폐콘크리트 분말의 입자 크기는 크게 나타났으며, 화학성분은 SiO_2 함량이 높게 나타났다. 한편, 도로포장은 대부분이 표층에 불투수층인 아스팔트 및 시멘트 콘크리트를 사용한 포장으로 노상과 표층이 차단됨에 따라 노상의 흙은 점진적으로 산성화가 진행되어 영양물질이 부족하여 미생물이 서식하지 못하게 될 뿐만 아니라 토양의 건조화가 진행되어 여러 가지 환경문제가 발생하고 있다. 연구 결과 개발된 Road Compound 및 New Road Compound로써 표층흙을 고화시킬 목적으로 사용할 경우 압축강도를 5MPa에서 최대 29MPa정도까지 발현시킬 수 있으므로 흙포장 도로의 사용목적에 따라 즉 압축강도가 12~15MPa 범위에서는 보도 및 자전거도로용, 15~18MPa 범위에서는 경교도로 및 주차장용, 18~25MPa 범위에서는 일반도로용으로 사용이 가능할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, Road Compound 및 New Road Compound의 혼합률을 조정하면 지반개량공사에 있어 연약지반 개량 및 안정처리용 등으로 폭 넓게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.