

# 순환골재를 포함한 입상재료의 특성에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on Characteristics of Granular Materials Containing Recycled Aggregates

홍석우 Hong, Seok-woo  
권기철 Gwon, Gi-cheol  
한영성 Han, Yeong-seong

정희원 · 동의대학교 토목공학과 조교수 (E-mail : hongswoo@deu.ac.kr)  
정희원 · 동의대학교 토목공학과 교수 (E-mail : gckweon@deu.ac.kr)  
정희원 · 동의대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : redsence@nate.com)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** In Korea, most designs of pavement had been mainly performed by considering CBR of granular materials before KPRP(Korea Pavement Research Program) and 86 AASHTO design method were introduced. Since then, the trend of the pavement designs gradually have moved to using mechanical characteristics throughout the resilient modulus based on the test results up to recently. In this study, we should like to research the mechanical characteristics of paving materials containing Recycled aggregates through the cyclic loading triaxial compression tests.

**METHODS :** The kinds of materials were tested; coarse grained subbase materials, refining aggregates base materials and recycled aggregates.

**RESULTS :** The present study aims to figure out the resilient modulus of paving materials containing Recycled aggregates through the cyclic loading triaxial compression tests.

**CONCLUSIONS :** The test results revealed that the engineering properties of the recycled aggregates were more excellent than the those of others.

### Keywords

*the resilient modulus, paving materials, recycled aggregates, coarse grained subbase materials, refining aggregates base materials, cyclic loading triaxial compression tests*

Corresponding Author : Hong, Seok-woo, Assistant Professor  
Department of Civil Engineering, Dong-eui University,  
176, Eomgwang-ro, Busanjin-gu, Busan, 614-714, Korea  
Tel : +82.51.890.1632 Fax : +82.51.890.2633  
E-mail : hongswoo@deu.ac.kr

International Journal of Highway Engineering  
<http://www.ijhe.or.kr/>  
ISSN 1738-7159 (Print)  
ISSN 2287-3678 (Online)

## 1. 서론

### 1.1. 연구 배경

도로 포장의 구조적인 안정성 확보와 더불어 이용자의 안전성과 쾌적성을 장기간 보장할 수 있도록 설계, 시공 및 유지관리 되어야 한다. 이러한 도로 포장의 목

적을 달성하고자 합리적 포장 단면설계, 고성능 포장재료 개발, 포장성능개선 등 매우 다양한 연구가 진행되어 오고 있다(The ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs, 2008; AASHTO, 2002).

특히 최근에는 교통하중 및 교통량의 급증, 이용자 욕

구 수준의 향상, 자동차 기술의 급격한 발전, 친환경적인 지속 가능한 개발에 대한 건설 패러다임의 변화 등으로 포장 관련기술의 외부적 환경이 급변하고 있고, 보다 정교하고 엄밀한 포장 구조해석 기법의 개발, 다양한 기능성 포장 재료의 개발, 포장 설계 입력물성치 평가기법의 발전, 시공 및 유지관리기술의 발전 등 내부적인 많은 기술적 환경변화가 이루어지고 있는 단계다.

입상의 재료는 자연상태에서 구득이 용이할 뿐 아니라 뛰어난 강도 및 강성도 특성, 배수성능, 필터기능, 시공의 용이성 등 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 장점에 대한 경험적 인식에 바탕하여 입상재료는 포장의 첫 출발이라 할 수 있는 로마시대 Appin Way부터 포장재료로 사용되기 시작하여 최근의 포장에서도 입상보조기층 또는 입도조정 보조기층의 형태로 사용되고 있다. 그러나 포장재료로 사용되는 입상재료에 대한 역학적 특성이 합리적으로 평가되기 시작한 것은 AASHTO 포장설계법이 개발되기 시작하면서부터로 오랜 역사를 가지고 있지는 못하다(AASHTO, 1986, 1993, 2002; The ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs, 2008).

국내의 입상재료에 대한 본격적인 역학적 특성에 대한 연구는 1990년대 중반 이후에 시작되어, 현재는 국내 입상재료를 보조기층 재료로 사용하는 경우에 대하여 탄성계수를 중심으로 한 기본적인 역학적 특성치가 규명되어 있는 단계다.

국내에서는 입상재료를 입상보조기층 또는 동상방지층 및 차단층에 국한하여 사용하고 있으며 입도조정기층의 활용도는 매우 낮은 실정이다. 특히 기층의 경우에는 도로의 종류에 무관하게 대부분의 경우 역청안정처리기층(Black Base, BB)이 아스팔트 포장의 기층으로 사용되고 있어 경제적이고 합리적인 설계가 어려운 실정이다.

세계적으로 CO<sub>2</sub> 배출 등으로 인한 지구 온난화 현상 등이 발생함으로써 환경에 대한 관심이 급증하고 있고, 지속가능한 개발의 측면에서 저탄소 녹색성장의 패러다임이 전반적인 공감대로 자리잡아가고 있다. 입상재료의 기본적인 수급원인 골재를 천연골재 채취로 획득하는 것은 이미 어려운 현실에 직면하고 있고, 석산개발을 통한 쇄석골재의 수급 또한 자연훼손 및 환경 파괴에 대한 우려에 직면하고 있다. 따라서 건설폐기물 중 대부분을 차지하는 폐콘크리트 및 폐아스콘을 골재원으로 사용하는 순환골재 사용의 필요성이 매우 증가하고 있는 실정이다(정종석 등, 2007). 이승준(2010), 홍석우 등

(2012)은 이러한 순환골재가 포장재료로서의 사용가능성 여부에 대해 순환골재 혼합물과 입상보조기층, 입도조정기층 등을 비교하여 예비실험을 한 바가 있고, 사용의 가능성이 큰 것으로 발표되었다.

자원에 대한 재활용의 문제가 중요해짐에 따라 국내에서 발생하는 건설폐기물에 대한 재활용 비율도 1998년 84%에서 2004년 90%로 지속적으로 증가하고 있으나 대부분 복토 및 성토용 등 단순 재활용되고 있는 실정이다. 이러한 원인 중 하나는 건설폐기물을 활용한 우수한 품질의 다양한 대체재료 개발이 미흡하기 때문이다.

미국에서는 2002 AASHTO 포장설계법 개발을 통하여 과거의 경험적 포장설계법에서 역학적-경험적 포장설계법으로 전환을 가져왔으며, 국내에서도 역학적-경험적 방법을 기반으로 하는 한국형포장설계법이 완성되어 가는 단계다(The ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs, 2008). 역학적-경험적 포장설계법에서 기본적인 입력물성치는 탄성계수를 중심으로 한 변형특성이 적용되고 있다. 따라서 새로운 포장재료의 개발과 적용을 위해서는 반복하중 조건에서의 탄성계수 평가와 관련된 역학적 특성치를 평가하는 것이 필수적이다.

입상재료의 다양한 장점에도 불구하고, 현재까지 국내에서는 입상재료를 입상보조기층 또는 동상방지층 및 차단층에 국한하여 적용하고 있었으나 본 연구를 통하여 다양한 활용방안을 제시하였다. 본 연구에서는 순환골재 혼합물의 입상재료로서의 사용성을 판단하기 위해 반복하중조건에서의 변형특성을 평가하였고, 이를 기존에 널리 사용하고 있는 입상보조기층 재료와 시방서 기준에 맞춘 입도조정기층 재료의 결과와 비교·분석하였다.

## 1.2. 연구목적 및 내용

본 연구는 입상재료의 탄성계수를 중심으로 한 역학적 특성을 평가하여, 입상재료의 다양한 활용방안을 제시하는 것이다. 이를 위하여 반복재하식 삼축압축시험에 의한 탄성계수를 평가하였다. 본 연구에서 적용한 입상재료는 국내에서 가장 많이 사용되는 입상보조기층, 입도조정기층 그리고 순환골재 혼합물에 대한 시험을 수행하였다.

순환골재를 활용하여 재생 아스팔트 혼합물 또는 시멘트 콘크리트 골재용으로 사용하는 경우 등에 대해서는, 각각의 조건에 따른 시방규정을 두고 있으나, 보조기층 또는 다공성의 입도조정기층 역할과 같이 활용하는 경우에 대해서는 특별한 시방기준이 개발되어 있지 못하다.

따라서 현재 국내에서 생산되는 일반적인 순환골재에 대하여 보조기층 또는 입도조정기층으로서의 품질을 시험을 통하여 그 적용성을 확인하였다.

입상보조기층 시료는 실제 현장에서 사용하는 재료를 채취하였고, 입도조정기층은 하나의 골재원에 대하여 시방입도 범위에서 입도변화를 조절하여 제조하였다. 순환골재 혼합물은 페콘크리트 및 페아스콘을 순환골재로 사용하여 시멘트와 첨가제를 일정한 비율로 혼합하여 제조하였다.

본 연구에서는 한국형포장설계법에서 적용하고 있는 반복재하식 삼축압축시험을 통하여 입상재료의 탄성계수를 평가하였다. 시험의 절차는 각 입상재료 층이 실제 공용상태에서 경험하는 응력범위를 고려하여 결정하였다.

## 2. 입상재료의 변형특성 및 포장설계 입력물성치

### 2.1. 입상재료의 포장설계 입력물성치

입상재료는 보조기층, 섶석기층, 차단층 또는 동상방지층으로 도로 포장체에 활용되고 있다. 포장체의 전체 거동 특성 평가에 가장 중요한 물성치는 탄성계수로 대표되는 변형특성이다. 이러한 변형특성은 포장체가 경험하는 응력범위에서 반복하중 조건에서의 탄성계수에 대한 변형특성을 포함한다.

### 2.2. 입상재료의 탄성계수 특성 및 평가기법

#### 2.2.1. 입상재료의 탄성계수 특성

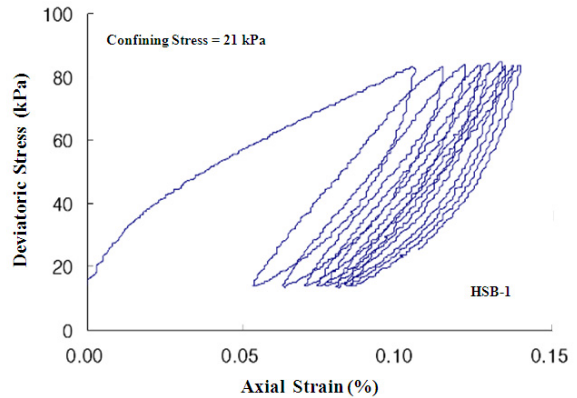
탄성계수는 차량하중의 반복재하 조건에서 유발되는 포장재료의 응력-변형 상태를 반영한 특성치로서, 역학적인 포장설계 및 해석에 기본이 되는 입력물성치이며, 포장재료의 특성을 가장 합리적으로 반영할 수 있는 물성치로 평가되고 있다. AASHTO 포장설계법에서 회복탄성계수를 입력물성치로 적용한 이후, 포장 설계·해석뿐 아니라 포장 평가, 유지관리 등에도 회복탄성계수를 이용하는 방법이 보편화 되어가고 있다.

입상재료의 탄성계수는 매우 다양한 요소에 영향을 받는다. 대표적인 영향요소로는 간극비, 건조단위중량, 함수비, 과압밀비 등과 같은 재료적인 요인과 변형률 크기, 구속응력, 하중주파수, 하중반복횟수, 응력경로 등과 같이 시료가 경험하는 시험조건으로 나누어진다 (Rhee, 1991). 시험을 통하여 탄성계수를 평가하는 경우에는 간극비, 건조단위중량, 함수비 등을 현장조건과 동일하게 또는 유사하게 제작된 시편을 사용하게 되므

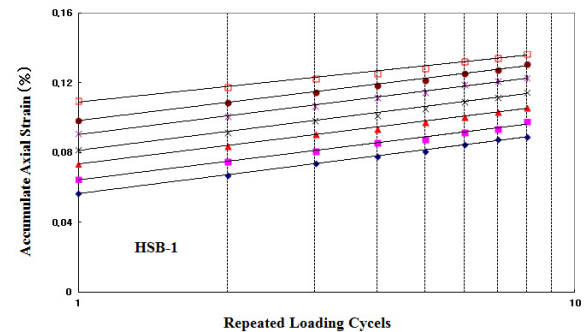
로 변형특성에 대한 재료적 요인은 시편 성형과정에서 반영된다.

입상재료의 경우 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향이 없다는 것은 매우 일반적으로 알려진 사실이며, 국내 보조기층 재료에 있어서도 탄성계수에 대한 하중주파수의 영향은 없는 것으로 알려져 있다(권기철, 2004).

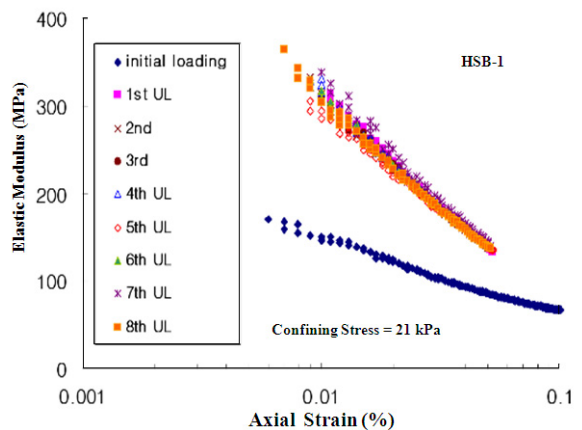
입상재료에 있어서 하중반복횟수의 탄성계수에 대한 영향에 대해서는 많은 논란이 있었다.



(a) Stress-Strain Relationship



(b) Accumulate Plastic Deformation-Number of Loading Cycle Relationship by Phased Deviatoric Stress



(c) Elastic Modulus-Axial Strain Relationship

Fig. 1 Effect of Number of Loading Cycle of Granular Materials

권기철(2004)은 비틀전단시험을 통하여 미소변형률 영역(변형률 크기  $10^{-4} \sim 10^{-3}\%$ )에서는 입상보조기층 재료의 탄성계수가 하중반복횟수에 따른 탄성계수의 변화는 없는 것으로 보고하고 있다. 실제 포장 공용상태에서 보조기층 재료가 경험하는 중간변형률 범위( $10^{-2} \sim 10^{-1}\%$ )의 삼축압축시험에서는 Fig. 1과 같은 결과를 보고하고 있다.

입상재료의 탄성계수에 대한 가장 큰 영향요소는 구속응력으로 알려져 있다. 국내 입상보조기층도 입상재료의 탄성계수 또한 구속응력의 영향을 매우 크게 받으며 이를 고려한 다양한 구성모델이 제안되어 있다(Rhee, 1991). 지금까지 알려진 대표적인 모델은 체적응력의 영향만을 고려한 체적응력 모델로 AASHTO에서도 이를 받아들이고 있으며 국내 보조기층 재료에 대해서도 적용성이 확인된 바 있다.

일반적으로 탄성계수에 대한 구속응력의 영향은 Eq. (1)과 같이 대수구속응력의 증가에 따라 대수탄성계수가 직선적으로 증가하는 것으로 모델하고 있다. 그러나 권기철(2004)의 연구에 의하면 실제 공용 중 보조기층이 경험하는 응력범위에서는 선형영역의 결과를 직선의 관계로 표현한 Eq. (2)와 같은 구속응력에 대한 모델을 제안하고 있다. 이러한 국내의 입상보조기층에 대한 연구성과는 한국형포장설계법에 반영되고 있다.

$$E = k_1(P)^{k_2} \quad (1)$$

여기서,  $E$  = 탄성계수

$P$  = 구속응력

$k_1, k_2$  = 모델계수

$$E = k_1 + k_2(P) \quad (2)$$

여기서,  $E$  = 탄성계수

$P$  = 구속응력

$k_1, k_2$  = 모델계수

구속응력의 영향 뿐 아니라 전체 변형률 영역에서의 입상재료에 대한 구성모델이 Eq. (3)과 같이 제안된 바 있다(권기철, 2004). 이러한 구성모델은 서로 다른 변형률 범위에서 시험이 수행되는 다양한 시험기법(공진주시험, 반복재하시험 MR 시험, FWD, SASW, 평판재하시험 등)의 통합적인 평가에 활용성이 큰 장점이 있다.

$$E = (k_1 + k_2(P)) \cdot f_{(\epsilon)} \quad (3)$$

여기서,  $E$  = 탄성계수

$P$  = 구속응력

$k_1, k_2$  = 모델계수

$f_{(\epsilon)}$  = 변형률 크기 영향의 함수

## 2.2.2. 입상재료의 탄성계수 평가기법

최근에는 보조기층 재료의 탄성계수 평가에 매우 다양한 시험기법이 적용되고 있다. 실내시험으로는 반복재하시험 MR시험, 정적삼축압축시험(TX), 공진주/비틀전단시험(RC/TS) 등이, 시공단계 또는 공용상태 현장시험으로는 평판재하시험, FWD, 표면파기법(SASW) 등이 적용되고 있다(권기철 등, 2002; 서원석 등, 2003; AASHTO, 1993). 한편, 각 시험의 수행되는 변형률 크기, 구속응력, 하중주파수, 하중반복횟수 등의 차이로 인하여 각각의 시험에서 결정되는 탄성계수는 서로 다른 값으로 결정된다. 과거에는 이러한 시험조건의 차이를 고려하지 않고 각각의 시험에서 결정되는 탄성계수를 서로 다른 물성치로 인식하였다. 그러나 다양한 연구를 통하여 “정적, 동적 또는 반복재하시험 중 어떠한 시험방법으로 시험이 실시되는가에 관계없이 탄성계수에 대한 영향요소를 합리적으로 고려한다면 동일한 탄성계수를 얻을 수 있다”(권기철 등, 2000; Burland, 1989; Goto 등, 1991)는 인식을 공유하게 되었다.

이러한 변형특성에 대한 기본적인 인식에 기초하여 i) 각각의 시험에서 얻은 결과들을 서로 독립적으로 평가하는 것이 아니라 변형특성을 고려하여 서로 결합함으로써 변형특성을 다양한 시험으로부터 종합적으로 평가하는 기법(권기철 등, 2002), ii) 대체 MR 시험기법 또는 시공단계의 현장시험과 같이 특정한 시험조건에서 결정되는 탄성계수를 설계 또는 해석조건에 합당한 탄성계수로 전환하는 기법(Kim 등, 2001), iii) 변형특성에 민감한 영향인자를 반영한 설계입력변수 결정 시험조건의 수립 및 구성모델의 개발과 같은 연구가 진행된 바 있다.

회복탄성계수(MR : Resilient Modulus)로 대표되는 포장 하부구조 재료(노상토 및 보조기층 재료)의 탄성계수는 포장 하부구조의 대표적인 역학적 물성치로 인정받고 있다. 이에 따라 보조기층 재료의 탄성계수는 포장설계법에서 기본 입력물성치로 채택되고 있고(AASHTO, 1986), 다짐 시공의 품질관리 및 포장 유지관리 등에도 탄성계수를 활용하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있다(박태순 등, 2001; 최준성 등, 2002).

이러한 연구성과를 반영하여 한국형포장설계법에서는 반복재하-정적삼축압축시험을 기본으로 하는 탄성

계수평가 기법을 기본 시험법으로 적용하고 있다.

### 3. 시험장치 및 시험시료

#### 3.1. 시험시료

##### 3.1.1. 입상보조기층

본 연구에서는 실제 고속도로 현장에서 사용 중인 7종의 보조기층 재료를 채취하여 시험에 적용하였다. 선정된 7종의 보조기층 시료는 통일분류법으로 GP 또는 GW, AASHTO 분류로 A-1-a, AASHTO T294-92I 분류로는 material type I에 해당하였고, CBR 값은 39에서 88의 범위로 나타났다. 보조기층 시료의 물성치를 정리하면 Table 1과 같고, 입도분포는 Fig. 2와 같다.

Table 1. Material Property of Coarse Grained Subbase

	Material Characteristics		Compection Characteristics	
	Unified Soil Classification	AASHTO Soil Classification	$\gamma_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	OMC (%)
HSB-1	GW	A-1-a	2,314	6.4
HSB-2	SP	A-1-a	2,248	6.7
HSB-3	GW	A-1-a	2,423	6.8

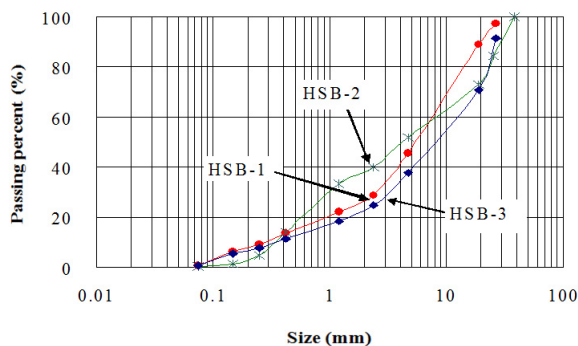


Fig. 2 Particle Size Distribution of Coarse Grained Subbase

##### 3.1.2. 입도조정기층

국내에서는 현재 입도조정기층을 사용하고 있지 않아서 실제 현장에서 사용하고 있는 입도조정기층 시료를 채취할 수 없었다. 따라서 시방기준에 합당한 쇄석골재를 입도별로, 각 입도의 골재를 합성하여 입도조정기층의 입도범위에 합당한 시료를 인위적으로 제조하였고 (홍석우 등, 2012), 입도분포를 달리하여 상한계 입도 시료(SU), 중간 입도 시료(SM), 하한계 입도 시료(SL)에 대하여 시험을 수행하였다. 입도조정기층 시료의 입도분포는 Fig. 3과 같고, 물성치를 정리하여 Table 2에 나타내었다.

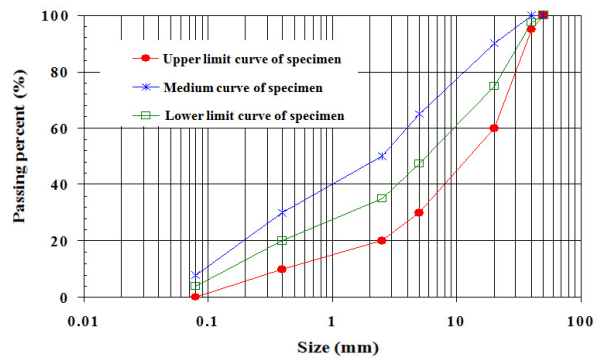


Fig. 3 Particle Size Distribution of Refining Aggregates Base Materials

Table 2. Material Property of Refining Aggregates Base Materials

		SU	SM	SL
Compaction Test	$\gamma_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	2.28	2.29	2.21
	OMC (%)	2.7	3.8	3.1
Soil Classification	Unified Soil classification	SP	GW	GW
	AASHTO Soil classification	A-1-a		
mechanical analysis	CC	0.42	1.57	3.25
	CU	42.1	63.3	50.0
	#200 passing percent (%)	8.2	4.0	0.2
	#4 passing percent (%)	64.0	46.0	29.8
PI (%)		NP		
CBR (%)		45	127	110

##### 3.1.3. 순환골재

순환골재는 페아스콘 골재와 폐콘크리트 골재를 일정 비율로 혼합하여 사용하였다. 일정한 비율로 혼합된 순환골재에 시멘트, 유화아스팔트, 아크릴 폴리머를 섞어 혼합물의 형태로 제조하였다.

순환골재를 이용한 포장체의 효율적인 활용을 위하여 기층용 재생아스팔트 혼합물, 표층용 재생아스팔트 혼합물, 입상보조기층용 순환골재 등이 다양하게 개발되고 있으나 아직까지도 대부분은 복토 및 성토용 등 단순 재활용에 머물고 있는 실정이다. 보다 다양한 활용을 위해서, 본 연구에서는 순환골재의 85% 이상을 차지하는 페아스콘 골재와 폐콘크리트 골재를 입도조정한 후 약간의 첨가제를 추가하여 배수성이 있는 기능성 포장층 재료의 개발 가능성을 검토하고자 하였다.

페아스콘 골재와 폐콘크리트 골재는 재료분리를 막기 위하여 30~25mm, 25~13mm, 13~8mm, 8mm 이하로 분류하여 보관하고 있으며, 본 연구에서도 분류 보관된 골재를 일정한 혼합비율로 조제하였다.

본 연구에 사용된 페아스콘은 경기도 북부에서 채취

되었으며, 구재 아스팔트 함유량 및 침입도 시험을 실시한 결과 구재 아스팔트 함유량은 추출법에 의한 함유량 4.36%, 연속법에 의한 함유량은 4.54%이며, 침입도의 평균은 20으로 측정되었다.

최종적으로 혼합된 순환골재의 구성비율은 Table 3에 나타내었다. 본 연구의 목적은 각각의 순환골재가 역학적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 페아스콘 골재와 페콘크리트 골재의 구성비를 변화시키며 시험을 수행하였다.

Table 3. Composition Ratio of the Mixture Using Recycled Aggregates

	Weight ratio (%)			
	RAP-1	RAP-2	RAP-3	RAP-4
Wasted Asphalt Concrete	48.0	38.0	28.0	18.0
Wasted Concrete	48.0	58.0	68.0	78.0
Cement	4.0			
Agents	Acryl polymer	5.0		
	Emulsified asphalt	1.5		

상온에서 고체 또는 반고체 상태인 직류 아스팔트를 가열하지 않고 상온에서 사용할 수 있도록 아스팔트를 미립으로 만들어 물속에 분산시키는 유화아스팔트를 이용하여 고유의 기능을 최대한 활용하였다. 음이온계 유화아스팔트는 도데실벤젠설포산염을 아스팔트와 혼합하여 제조할 수 있으며, 골재와의 부착성을 용이하게 하고, 시멘트와 물과의 중합반응으로 안정성을 높여준다.

아크릴폴리머는 경질 단분자 원료인 MMA(methyl methacrylate), 연질 단분자 원료인 BAM(buthyl acryl monomer), 물, 알킬폰산염이 혼합되어 제조되며, 촉매로 분말형태의 과황산암니늄 및 중아황산소다가 포함된다. 아크릴폴리머는 시멘트와 페골재 사이에서 경화되면서 강도를 증진시키고 혼합물의 혼합성을 증진하는 역할을 한다.

### 3.2. 시편 성형기법

#### 3.2.1. 입자크기를 고려한 모델시료 성형기법

시편의 직경은 시료 최대입자크기의 5배 이상이 되어야 시편 크기에 대한 영향을 무시할 수 있다(Marachi 등, 1972; Su, 1989; Indraratha 등, 1993). 본 연구에 적용된 입상재료는 최대입경 25~30mm 로서 직경 150mm 이상의 대형 시편을 성형하여 시험을 수행하여야 한다.

본 연구에서 적용한 삼축압축시험장치는 시편 직경 100mm 규격으로 원시료에 대한 시험이 불가능하여 입

도를 조정한 모델시료에 대한 시험을 수행하였다.

모델시료를 성형하는 방법은 크게 matrix model, replace model, parallel model이 있으며 본 연구에서는 matrix model을 적용하였다. matrix model은 원시료에서 시험이 가능한 최대입자크기 이상을 모두 제거하고 남은 입자만으로 시료를 성형하는 방법이다.

#### 3.2.2. 시편성형 다짐기법

본 연구의 입상재료 모두에 대하여 충격다짐에 의한 시편성형 기법을 적용하였다.

시편은 균질성 확보를 위하여 5층으로 성형하였고, 시료의 성형함수비는 다짐시험에서 결정된 최적함수비(OMC)로 하였다. 성형된 시편의 건조단위중량은 다짐시험에서 결정된 최대건조단위중량의 95%를 목표로 성형하였다. 이것은 실제 다짐시공에서 품질관리에 사용되는 다짐도 기준이 95%임을 반영한 것이다. 순환골재 혼합물의 경우에는 별도의 다짐시험이 불가능하였으므로 다짐에너지를 조절하는 방법으로 시편을 성형하였다. 이때 다짐에너지는 KS F 2312의 D다짐 에너지를 적용하였다.

### 3.3. 시험장치 및 시험절차

#### 3.3.1. 반복재하 삼축압축시험

본 연구에서는 동일한 삼축압축시험장치를 사용하여, 각각의 시편에 대하여 서로 다른 시험방법을 적용하여 반복하중에 따른 변형특성을 평가하였다. 시험에 사용한 삼축압축시험장치는 변형률 조절(strain control) 방식이고, 하중계(load cell, 용량 20kN)와 변형측정을 위한 LVDT (용량 20mm)는 삼축셀 외부에 장착한 외부측정시스템을 적용하였다(Fig. 4). 구속 응력은 공기압을 사용하였으며 압력계(용량 10kg/cm<sup>2</sup>)

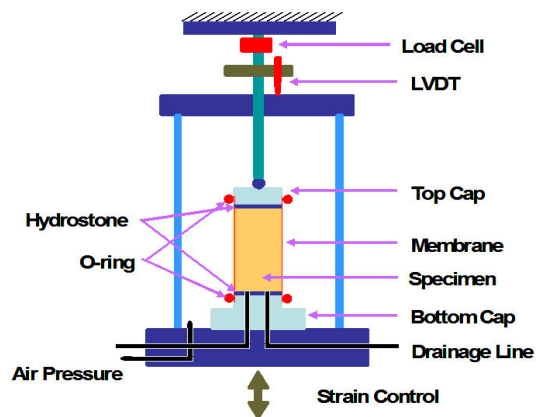


Fig. 4 Overview of Triaxial Compression Test Apparatus

와 레귤레이터(regulator)를 사용하여 일정한 구속응력을 제어하였다. 자료 획득은 정적 데이터로거를 사용하였다.

함수비 조절된 시료가 준비되면 시편 다짐몰드를 준비한다. 다짐몰드 내부에 얇은 필름(OHP 필름)등을 넣어 시편 추출 시 시편의 손상을 줄이고자 하였다. 함수비 조절이 완료된 시료를 사용하여 5층 다짐으로 시편을 성형하였다. 마지막 층이 목표 높이까지 다져지면 몰드직경보다 약간 작은 둥근 쇠판을 놓고 가볍게 타격하여 시편의 가장 윗면을 매끄럽게 정형하였다.

성형된 시편의 건조단위중량 및 다짐도를 측정하고, 최종적으로 성형된 시편의 외형적인 손상을 육안으로 평가하여 손상이 발견되면 시편을 다시 성형하였다. 외형적인 손상이 없더라도 시편추출과정 등에서 과도한 하중이 시편에 가해진 경우에는 시편을 다시 성형하였다.

시편이 준비되면 시험장치에 시편을 설치하고, 하부판(base plate)에 설치된 배수구멍(drainage hole)이 열림 상태가 되도록 하였다. 본 연구에서는 외부변형 측정장치를 사용하고 있고 변형특성 평가 범위가 중간변형률 이하이므로 시편과 단부캡 사이의 오차(단부오차)를 효과적으로 제거해야 한다. 이러한 단부제거 효과 목적으로 성형된 시편의 양단부를 석고로 처리하여 시험장치에 거치하는 방법을 적용하였다(김동수 등, 1996). 석고 양생을 위한 2시간 이상의 대기시간을 둔 후, 구속응력을 재하한 상태에서 1시간 이상 여유를 두어 균일한 구속응력이 재하되도록 하였다.

초기 구속응력의 크기는 104kPa를 적용하였으며, 초기 구속응력조건에서 육안으로 시편이 구속응력이 재하되었는지 멤브레인의 상태를 육안으로 관찰하고 안정응력을 재하하였다. 안정응력은 13.8kPa를 적용하였으며 하중재하 순서는 Table 4를 적용하였다.

Table 4. Load Combinations of Cyclic Loading Triaxial Compression Tests

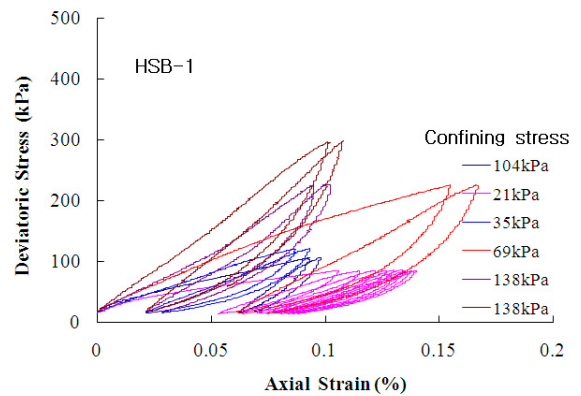
Confining Stress (kPa)	Repeated loading cycles	Deviatoric Stress (kPa)	
		Loading	Reloading
104	2	0 → 104	104 → 0
21	2	0 → 69	69 → 0
35	2	0 → 104	104 → 0
69	2	0 → 207	207 → 0
104	2	0 → 207	207 → 0
138	2	0 → 276	276 → 0

seating pressure : 13.8 kPa, strain rate : 0.04%/min

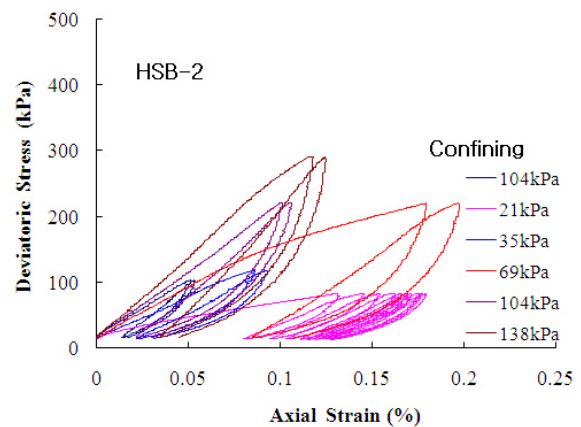
## 4. 다양한 입상재료의 역학적 특성 평가

### 4.1. 입상보조기층의 역학적 특성 평가

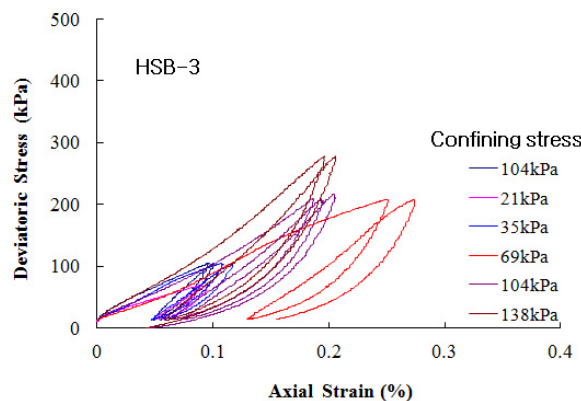
국내에서 사용하는 대부분의 입상보조기층 재료는 자갈 또는 쇄석에 모래 또는 스크리닝스를 혼합하여 만들어진다. 통일분류법으로는 GP 또는 GW, AASHTO 분류로는 A-1-a 에 해당한다. 비소성의 세립분을 함유하고 있어서 물의 영향을 거의 받지 않는 비소성(NP) 재료이며 #200체 통과량은 거의 대부분 5% 미만이다.



(a) HSB-1



(b) HSB-2



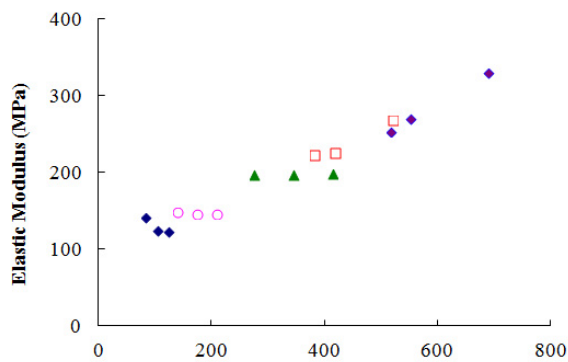
(c) HSB-3

Fig. 5 Stress-Strain Relationship of Coarse Grained Subbase Materials

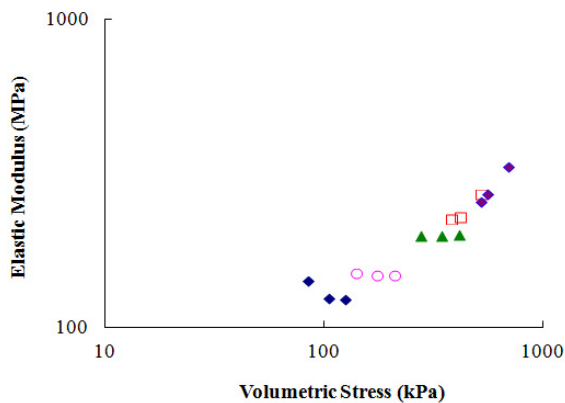
본 연구에서 적용한 입상보조기층 재료 또한 국내의 일반적인 특성에 부합되는 재료다.

Fig. 5는 본 연구에 사용된 입상보조기층 재료의 반복재하 삼축압축시험에서 결정된 응력-변형률 관계를 나타낸 것이다. 구속응력이 증가하면서 탄성계수가 증가하고, 축차응력의 증가에 따라서 변형률 경화가 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 입상보조기층 재료의 체적응력에 따른 탄성계수의 변화를 선형영역 및 대수영역에서의 변화 일례를 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 입상보조기층 재료의 탄성계수는 구속응력(체적응력)의 영향을 대단히 크게 받을 수 있다.



(a) linear



(b) algebra

Fig. 6 Change of Elastic Modulus According to Volumetric Stress of Subbase Materials (HSB-1)

일반적으로 입상재료의 탄성계수에 대한 체적응력의 영향은 대수함수로 모델하는 것이 일반적이다. 그러나 한국형포장설계법에서 포장 공용하중 범위에서는 대수함수보다 Eq. (2)와 같은 선형함수의 적용성이 더욱 우수한 것으로 평가하고 대표적인 구성모델로 채택하고

있다(The ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs, 2008). 본 연구에서 수행된 입상보조기층 재료의 경우에도 선형함수로 체적응력의 영향을 잘 표현할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 7은 입상보조기층 시험에서 수행된 입상보조기층 재료의 체적응력에 따른 탄성계수 변화를 나타낸 것이다. 한국형포장설계법 연구에서, 국내 입상보조기층 재료의 탄성계수는 개략적으로 50MPa~400MPa 범위에 존재하는 것으로 보고되고 있으며, 본 연구에서 적용한 입상보조기층 재료의 탄성계수 또한 이러한 범위에서 결정되었다.

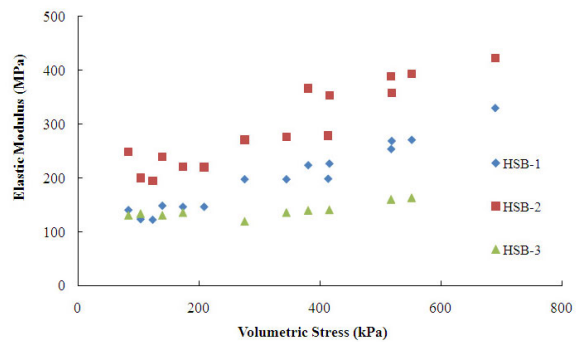


Fig. 7 Change of Elastic Modulus According to Volumetric Stress of Coarse Grained Subbase Materials

Fig. 7로부터 입상보조기층 재료의 경우 Eq. (2)와 같은 선형함수의 구성모델 적용성이 매우 우수함을 알 수 있으며, 선형함수의 구성모델을 적용하여 결정된 모델계수는 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Model Coefficients of Elastic Modulus Constitution Model of Coarse Grained Subbase Materials

	$k_1$	$k_2$	$r_2$
HSB-1	87.04	0.30	0.96
HSB-2	148.6	0.38	0.89
HSB-3	109.8	0.07	0.78

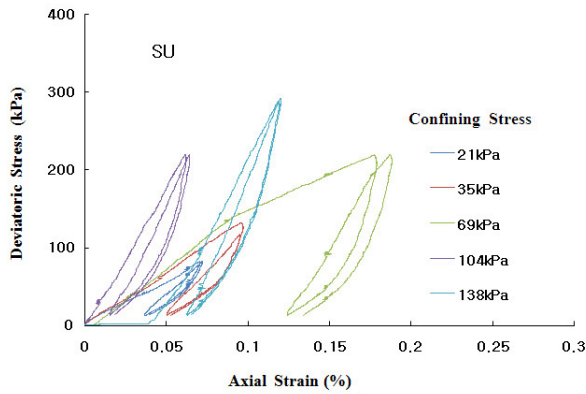
Fig. 7에 나타난 바와 같이 동일한 입상보조기층 재료에 있어서도 입상보조기층이 경험하는 공용하중 범위에서 100MPa 이상 탄성계수가 변화한다. 따라서 하나의 탄성계수 값을 사용하여 포장 구조해석을 수행하는 경우에는 입상보조기층 재료가 경험하는 대표적인 응력 조건을 결정하는 것이 매우 중요함을 확인할 수 있다.

#### 4.2. 입도조정기층의 역학적 특성 평가

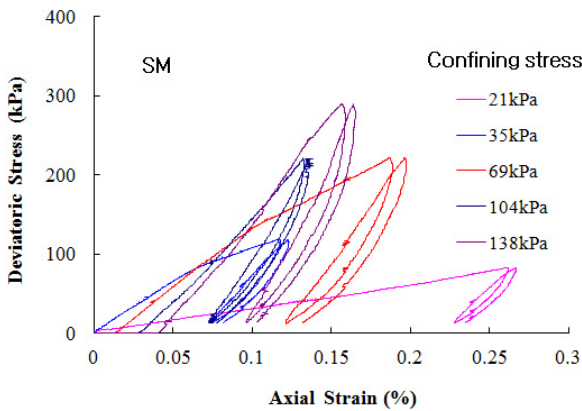
Fig. 8은 입도조정기층 재료의 반복재하 삼축압축시



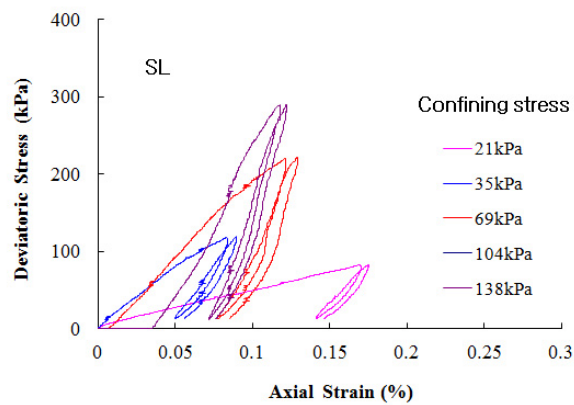
험에서 결정된 구속응력 단계별 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 입도조정기층 재료의 경우에는 축차응력이 증가하면서 탄성계수가 증가하는 응력경화(stress hardening)의 경향이 입상보조기층 재료에 비하여 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러나 전체적으로는, 입도조정기층 재료의 응력 - 변형률 곡선의 형태 및 체적응력에 따른 탄성계수 변화의 형태는 입상보조기층의 경



(a) SU



(b) SM

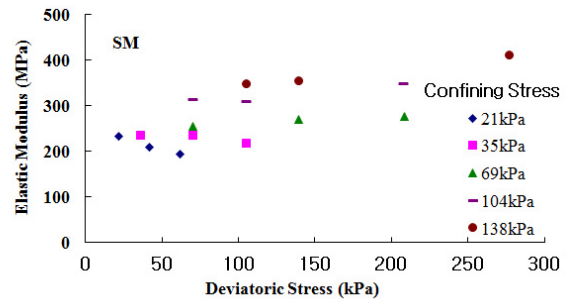


(c) SL

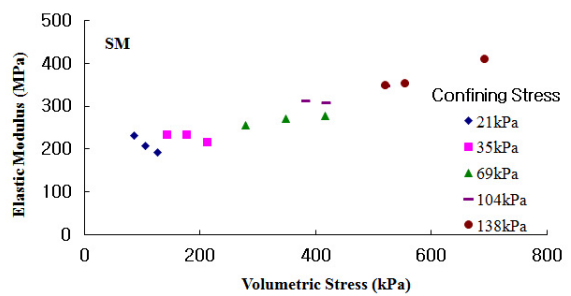
Fig. 8 Stress-Strain Relationship of Refining Aggregates Base Materials

우와 매우 유사하게 결정됨을 확인할 수 있다. 입도조정기층의 탄성계수는 동일한 구속응력에서 축차응력이 증가하면서 증가하는 응력경화 현상을 보이고 있으며, 이러한 응력경화 현상은 축차응력의 영향 보다는 체적응력의 영향이 탄성계수에 매우 크게 영향을 미치고 있음을 나타내는 것이다.

Fig. 9는 입도조정기층 재료의 축차응력 및 체적응력에 따른 탄성계수 변화의 일례를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)를 살펴보면 낮은 구속응력 단계에서는 축차응력이 증가하면서 탄성계수가 감소하고 높은 구속응력 단계에서는 축차응력의 증가에 따라서 탄성계수가 증가하는 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 낮은 구속응력 단계에서는 구속응력의 영향보다는 축차응력의 영향이 보다 크게 작용한 결과로 판단된다. 체적응력에 따른 탄성계수의 변화(Fig. 9(b))는 매우 좋은 선형의 상관성을 보이고 있음을 알 수 있어, 입도조정기층의 탄성계수는 체적응력에 매우 큰 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Elastic Modulus Change of Deviatoric Stress



(b) Elastic Modulus Change of Volumetric Stress

Fig. 9 Cyclic Loading Triaxial Compression Tests Result According to Refining Aggregates Base Materials

입도조정기층 재료의 체적응력에 따른 탄성계수 변화의 형태는 입상보조기층의 경우와 매우 유사하게 결정됨을 확인할 수 있으며, 입도변화에 따른 탄성계수의 변화는 크지 않음을 알 수 있다.

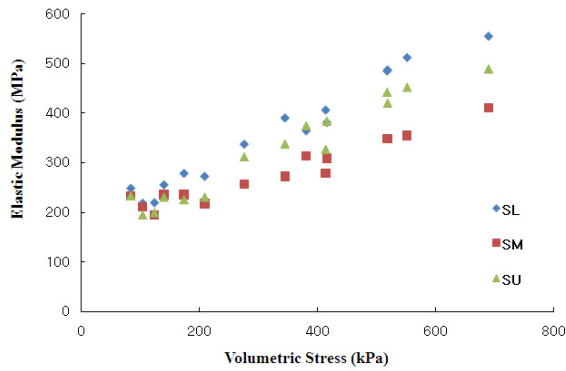


Fig. 10 Elastic Modulus of Refining Aggregates Base Materials According to Particle Size Distribution

입도조정기층 재료에 대하여 Eq. (2)와 같은 선형함수의 구성모델을 적용하여 결정된 모델계수는 Table 6에 정리하였다. Fig. 10에서 체적응력에 따른 탄성계수 변화정도 (기울기)는 Eq. (2)의 모델계수  $k_2$ 로 표현된다. 모델계수  $k_2$ 는 입도분포에 따라서 일정한 경향은 발견할 수 없었다.

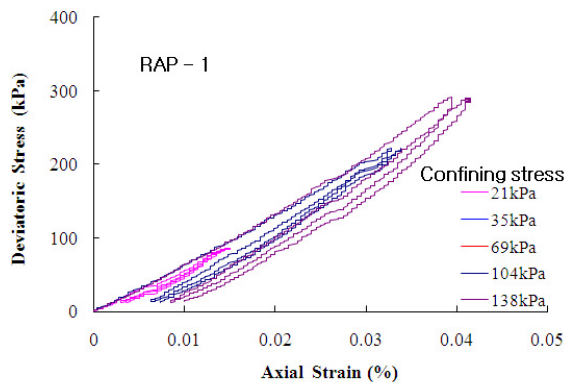
Table 6. Model Coefficients of Elastic Modulus Constitution Model of Refining Aggregates Base Materials

	$k_1$	$k_2$	$r_2$
SU	151.8	0.521	0.95
SM	173.3	0.327	0.93
SL	168.2	0.583	0.97

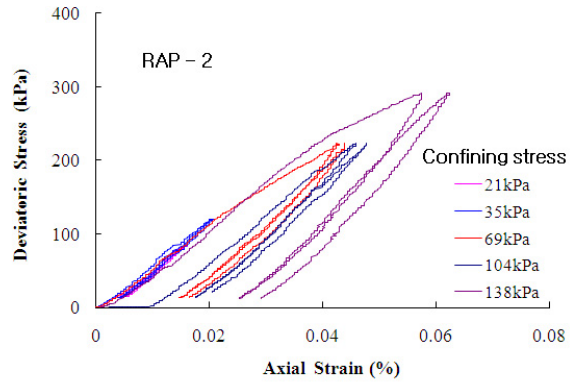
### 4.3. 순환골재 혼합물의 역학적 특성 평가

순환골재 혼합물의 반복재하 삼축압축시험에서 결정된 응력-변형률 관계 및 이로부터 결정된 응력조건에 따른 탄성계수 변화를 Fig. 11에 나타내었다.

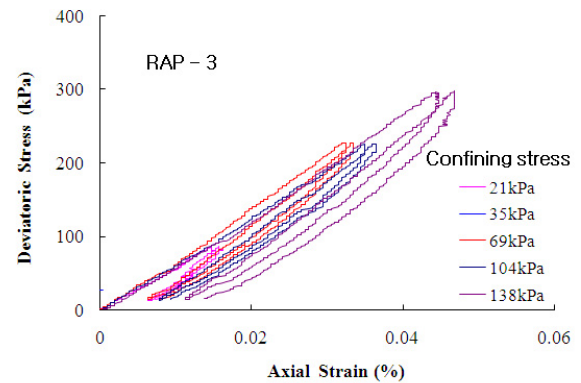
Fig. 11(a)에서 보듯이 순환골재 혼합물의 경우에는 초기하중 재하단계에서의 소성변형이 거의 발생하지 않고 있는 특징이 있다. 반복재하단계에서의 누적변형은 일부 발생하고 있으나, 이것 또한 입상보조기층 및 입도조정기층 재료의 경우보다 매우 작게 나타났다.



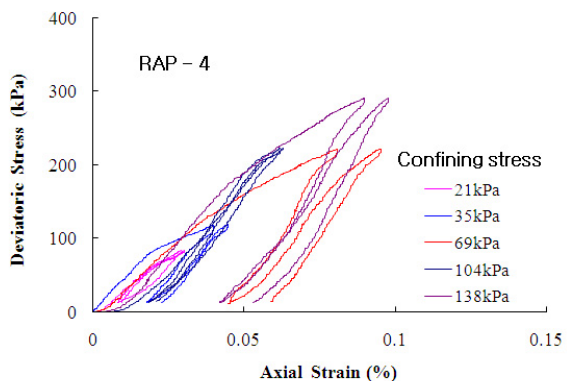
(a) RAP-1



(b) RAP-2



(c) RAP-3



(d) RAP-4

Fig. 11 Stress-Strain Relationship of Recycled Aggregates

Fig. 12는 순환골재 혼합물의 배합비에 따른 탄성계수 변화를 나타내고 있다. 본 연구에서 적용한 배합비율 범위에서는 모두 체적응력 모델의 적용 가능성이 충분한 것으로 나타났다.

Fig. 12에서 확인할 수 있듯이, 페아스콘 골재를 줄이고 페콘크리트 골재를 증가시킬수록 탄성계수는 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 페아스콘 골재에 포함된 페아스팔트의 함량이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 순환골재 혼합물을 실제 포장층에 적용하는 경우에는, 적용대상층에서 요구하는 물성치에 합당한 배합비의 결정이 필요한 것으로 판단된다. 그러나 모든 경우에 있어서 입도조정기층 및 입상보조기층 재료를 월등히 상회하는 탄성계수 값을 갖는 것으로 결정되었다.

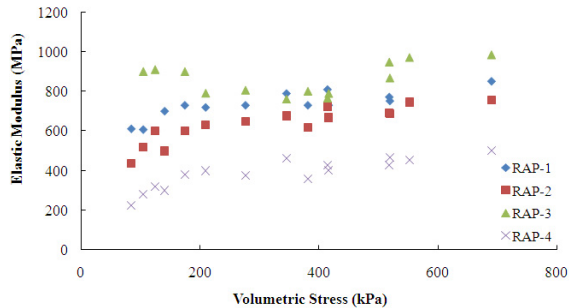


Fig. 12 Elastic Modulus of Refining Aggregates Base Materials According to Particle Size Distribution

Fig. 12로부터 순환골재 혼합물의 Eq. (2)와 같은 선형함수의 구성모델을 적용하여 결정된 모델계수는 Table 7에 정리하였다.

Table 7. Model Coefficients of Elastic Modulus Constitution Model of Recycled Aggregates Mixtures

	$k_1$	$k_2$	$r_2$
RAP-1	620.4	0.318	0.67
RAP-2	495.1	0.419	0.76
RAP-3	809.9	0.14	0.10
RAP-4	267.1	0.360	0.76

Fig 13은 입상보조기층, 입도조정기층, 순환골재 혼합물의 체적응력에 따른 탄성계수를 나타내고 있다. 입도조정기층 및 순환골재 혼합물 모두 실제 도로현장에서 사용되고 있는 입상보조기층의 탄성계수와 비슷하거나 높은 값을 나타내고 있다.

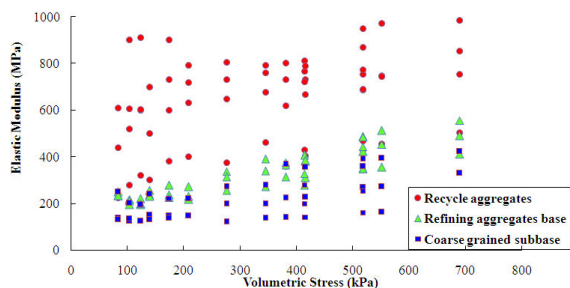


Fig. 13 Change of Elastic Modulus According to Volumetric Stress of Coarse Grained Materials

## 5. 결론

본 연구에서는 기존에 널리 사용되어 오고 있는 입상보조기층 재료의 역학적 특성 평가와 함께, 입도조정기층 및 순환골재 혼합물의 역학적 거동과 관련된 반복하중 조건에서의 변형특성을 평가하였다. 시험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 입상보조기층, 입도조정기층, 순환골재 혼합물 모두 탄성계수는 구속응력의 영향을 대단히 크게 받고 축차응력, 하중주파수, 하중반복횟수의 영향은 상대적으로 매우 작음을 확인하였고, 탄성계수는 체적응력의 영향만을 선형영역에서 고려하는 구성모델의 적용이 가능함을 확인하였다.
2. 입상보조기층 재료의 응력-변형률 관계에서, 구속응력이 증가하면서 탄성계수가 증가하고, 축차응력의 증가에 따라서 변형률 경화가 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 전체적으로는, 입도조정기층 재료의 응력-변형률 곡선의 형태 및 체적응력에 따른 탄성계수 변화의 형태는 입상보조기층의 경우와 매우 유사하게 결정됨을 확인할 수 있었다.
3. 입도조정기층의 탄성계수가 입상보조기층의 탄성계수에 비하여 변화의 폭이 매우 작게 나타나 보다 간단한 형태의 경험모형 개발도 가능할 것으로 판단된다.
4. 본 연구의 대상재료인 입상보조기층 입도조정기층 순환골재혼합물 중 순환골재혼합물의 공학적 특성이 포장재료로서 가장 우수한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 공학적 특성을 가지고 포장재료로서 가장 우수하다고 판단하기에는 무리가 있어 추가적인 역학적 성능평가가 필요한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

“본 연구는 ‘탄소중립형 도로 기술개발’ 연구단을 통하여 지원된 국토해양부(한국건설교통기술평가원) 2011년 건설기술혁신사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.”

## References

- Kweon, G. C., Kim D. S., 2000. Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Subbase Materials Using Free-Free Resonant Column Test, *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 2, No. 2, pp.149-161
- (권기철, 김동수 (2000), “현장공진주시험을 이용한 보조기층 재료의 대체 MR 시험법”, 한국도로학회논문집, 제2권, 제2호, pp. 149-161.)
- Kweon, G. C., Lee, G. H., Park, M. D., Gwon, S. M. 2002 Evaluation of Nonlinear Modulus of Subgrade Soils Using

- Field Tests, *Conference of Korean Society of Road Engineers*, pp.255-262
- (권기철, 이광호, 박만도, 권순민 (2002), “현장시험을 통한 노상토의 비선형 탄성계수 평가”, 한국도로학회 학술발표회 논문집, pp. 255-262.)
- Kweon, G. C. 2004. The Effect of Confining Pressure on Modulus of Soils at Low Confining Pressures, *Korean Geotechnical Society*, Vol. 20, No. 4, pp.57-63
- (권기철 (2004) “낮은 구속응력 단계에서 지반의 탄성계수에 대한 구속응력의 영향”, 한국지반공학회, 제20권 4호, pp. 57-63.)
- Kweon, G. C. 2004. Development of whole Strain Range Constitutive Model Considering Deformational Characteristics of Subbase Materials in Korea, *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 6, No. 3, pp.65-77
- (권기철 (2004) “국내 보조기층 재료의 변형특성을 고려한 전체 변형률 영역의 구성모델 개발”, 한국도로학회논문집, 제6권, 제3호, pp. 65-77.)
- Kim, D. S., Kweon, G. C. 1996. A Reliable Resilient Modulus Testing Technique on Subgrade Soils, *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 16, No. III-1, pp.81-91
- (김동수, 권기철 (1996), “신뢰성 있는 노상토의 회복탄성계수 시험법”, 대한토목학회지 논문집, 제 16권, 제 III-1호, pp. 81-91.)
- Park, T. S., Choi, j. S., Park, J. G. 2001. Use of Portable FWD for Determination of Resilient E Moduli, *Conference of Korean Society of Civil Engineering*, pp.1-4
- (박태순, 최준성, 박재균 (2001), “회복탄성계수 측정을 위한 Portable FWD의 활용”, 대한토목학회 학술발표회 논문집 pp. 1-4.)
- Par, H. I., Kweon, G. C., Oh, S. B. 2005. Prediction of Modulus of Subgrade Soils and Subbase Materials Based on Artificial Neural Network Model, *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol.25 No.2C, pp. 61-71
- (박현일, 권기철, 오세봉 (2005), “인공 신경망 모델에 근거한 노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수 추정”, 대한토목학회 논문집 제 25권, 제 2C호)
- Seo, Y. S., Kim, D. S., Kweon, G. C., No, H. S. 2003. Evaluation of Nonlinear Modulus of Subgrade Soils Using Repetitive Static Plate Bearing Load Test (PBT), *Conference of Korean Society of Road Engineers*, pp. 333-340
- (서원석, 김동수, 권기철, 노한성, (2003), “반복식 평판재하시험을 통한 노상토의 비선형 탄성계수 평가”, 한국도로학회 학술발표회 논문집, pp. 333-340.)
- Lee, S. J. 2010. *Evaluation on Stiffness of Crushed-stone Base Course Material and Recycled Aggregate with Triaxial Test*, Master's Thesis, Dong-eui University, Busan, Korea
- (이승준 (2010), “삼축압축시험을 이용한 쇄석기층 재료와 순환골재의 강성도 평가”, 석사학위논문, 동의대학교, 부산, 대한민국)
- Jung, J. S., Lee, J. S., Lee, D. H., Jun, M. H., Kim, H. J., Bang, J. D. 2007. A Study on Improvement of the System for Activation of Site Recycling of Construction Waste, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 23, No. 5, pp.117-124
- (정종석, 이재성, 이동현, 전명훈, 김효진, 방종대 (2007) “건설 폐기물의 현장 재활용 활성화를 위한 제도적 개선방안 연구” 대한건축학회논문집, 23권 5호, pp. 117-124.)
- Choi, J. S., Kang, G. J., Kim, J. M., No, H. S., Kim, T. S. 2002. Soil Compaction Management Methodology using Mechanical Properly, *Conference of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 4, No. 1, pp.271-276
- (최준성, 강규진, 김종민, 노한성, 김태수 (2002) “역학적 특성을 이용한 노상다짐도 평가를 위한 기초연구”, 한국도로학회 2002 학술발표회 논문집 : Vol.4 No.1 pp. 271~276.)
- Hong, S. W., Kweon, G. C., Kim, H. K., Han, Y. S. 2012. Mechanical Characteristics of Pavement Material using Recycled aggregate, *Conference of Korean Society of Road Engineers*, pp.233-238
- (홍석우, 권기철, 김형공, 한영성 (2012) “순환골재를 이용한 포장재료의 역학적 특성”, 한국도로학회 학술대회 논문집 pp. 233-238.)
- The ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs, (2008, 2009), “Korea Pavement Research Program” kprp H-08.
- AASHTO (1986), “AASHTO Guide for Design of Pavement Structure,” AASHTO, Washington, D.C.
- AASHTO (1993), “AASHTO Guide for Design of Pavement Structure,” AASHTO, Washington, D.C.
- AASHTO (2002) “AASHTO Guide for Design of New and Rehabilitated Pavement Structures”, AASHTO, Washington D.C.
- Buland, J. B. (1989), “Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture : Small is Beautiful-The Stiffness of Soils at Small Strains,” *Canadian Geotechnical Journal*, 26, pp. 52-65.
- Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y. S., and Sato, T. (1991), “A Simple Gage for Local Small Strain Measurement in the Laboratory,” *Soil and Foundations*, Vol. 31, No. 1, pp. 169-180.
- Indraratna, B., Wijewardena, L. S. S., and Balasubramaniam, A. S. (1993), “Large-Scale Triaxial Testing of Greywacke Rockfill,” *Geotechnique*, London, U.K., 43(1), pp.37-51.
- Kim, D. S, Kweon, G. C. and Rhee, S. (2001), “Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Subbase Soils Using Static Triaxial Test”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 38, No. 1, pp. 117-124.
- Marachi, N. D., Chan, C. K., and Seed, H. B. (1972), “Evaluation of Properties of Rockfill Materials, *Journal of Soil Mechanics and Foundation*,” ASCE, 98, pp.95-114.
- Rhee, S. K. (1991), “A Study of Resilient Behavior and Constitutive Modeling of Thick Granular Layers for Heavily Loaded Asphalt Pavement,” Ph.D Dissertation, Texas A&M University.
- Su, W. (1989), “Static Strength Evaluation of Cohesionless Soil with Oversize Particles”, Ph.D Dissertation, Washington State University.
- (접수일 : 2013. 2. 18 / 심사일 : 2013. 2. 19 / 심사완료일 : 2013. 3. 18)