

## 강화된 조립질 지반재료의 강도 및 강성 평가

### Strength-stiffness Evaluation of Cemented Coarse Geomaterials

조충연<sup>1)</sup>, Chung-Yeon Cho, 박성완<sup>2)</sup>, Seong-Wan Park, 안동석<sup>3)</sup>, Dong-Seok An, 박희문<sup>4)</sup>, Hee-Mun Park

<sup>1)</sup> 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Dankook University

<sup>2)</sup> 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Dankook University

<sup>3)</sup> 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Dankook University

<sup>4)</sup> 한국건설기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology

**SYNOPSIS** : In this study, coarse-grained geomaterials were mixed with cementing binder. To do that, typical soils from road construction sites were selected to assess the strength and stiffness characteristics of cemented geomaterials mixed with cement and recycled fly ash. Mechanistic evaluation on these samples was performed depending on the various binder contents. Increasing cementing content tend to increase the resilient modulus under repeated loadings and unconfined strength respectively. In addition, the toughness of cemented geomaterials was also estimated in order to check the ability to resisting fatigue failure.

**Keywords** : cemented geomaterials, unconfined strength, resilient modulus, toughness

## 1. 서론

도로와 철도 같은 대표적인 교통기반시설의 수요 증가로 인하여 현재 하부기초 지반재료에 적절한 종류의 혼합재료를 배합함으로써 새로운 형태의 공학적인 재료를 구성하여 구조적 및 경제적으로 효과적인 구조를 형성하는 안정처리기법에 대한 관심이 높다. 한편, 과거 도로 및 철도분야에서는 하부기초층 지반재료의 역학적 특성치를 상대적인 값으로 CBR 등 경험적 방법을 적용하여 평가하였다. 그러나 미국 AASHTO(1986)에서 제시한 역학적 해석을 위한 교통하중에 의한 회복변형 개념 도입이후 현재는 반복하중에 의한 회복탄성계수를 도로와 철도 같은 교통시설물 하부재료 층들의 강성에 대한 대표적인 설계입력 물성 값으로 활용하고 있어 이에 따른 회복탄성계수 측정의 중요성도 증대되고 있다(박성완 2008, 사공명 2008). 회복탄성계수는 차량하중의 반복재하 조건에서 유발되는 지반재료의 응력-변형 상태를 반영한 도로설계 및 해석에 기본이 되는 입력물성이며, 재료의 특성을 가장 합리적으로 반영할 수 있는 것으로 알려져 있다.

이에 본 연구에서는 국내 도로현장에서 일반적으로 많이 활용되고 있는 GW계열 쇄석 및 SM계열 노상재료에 대하여 강화 안정제의 종류 및 배합을 합리적으로 선정하고 7일 양생후 반복재하 회복탄성계수시험 및 일축압축조건에서의 강도-변형 시험을 실시하여 교통하중하 재료의 역학적 특성을 각각 파악하고자 하였다.

## 2. 지반재료의 시험조건

본 연구에 사용된 시료는 경기도 00지역의 조립질 지반재료로 기본물성은 표 1과 같다. 공시체는 최적 함수비와 최대건조단위중량의 조건에서 각각의 안정제를 함량별로 첨가하고 전단다짐의 원리를 활용한 선회다

짐기를 활용하여 직경 100mm와 높이 150mm로 제작하였다. 표 2는 공시체별 안정제 함유량을 나타낸 것으로써 재료에 대하여 각각 안정제 종류 및 함유량을 9가지로 선정하여 공시체를 제작하였다. 공시체 완성 후 항온항습 조건에서 각각 7일간 양생시킨 후 AASHTO TP46-94에 제시되어 있는 반복재하 회복탄성계수시험과 일축압축 강도-변형 시험을 실시하여 역학적 특성을 파악하였다.

표 1. 재료의 기본 물성

구 분		노상토	보조기층
소성지수(PI, %)		6.8	NP
흙 분류	통일분류	SM	GW
다짐시험결과	최적함수비(%)	15.8	6.42
	최대건조단위중량(KN/m <sup>3</sup> )	17.74	23.20

표 2. 공시체별 안정제 함유량

시 료 종 류	안정제 및 함량	기 호
SW(노상토)	Cement(1%)	C1
	Cement(3%)	C3
	Cement(5%)	C5
	Cement(1%), Fly-ash(5%)	C1F5
	Cement(1%), Fly-ash(10%)	C1F10
GW(쇄석)	Cement(3%), Fly-ash(5%)	C3F5
	Cement(3%), Fly-ash(10%)	C3F10
	Cement(5%), Fly-ash(5%)	C5F5
	Cement(5%), Fly-ash(10%)	C5F10

### 3. 시험 결과

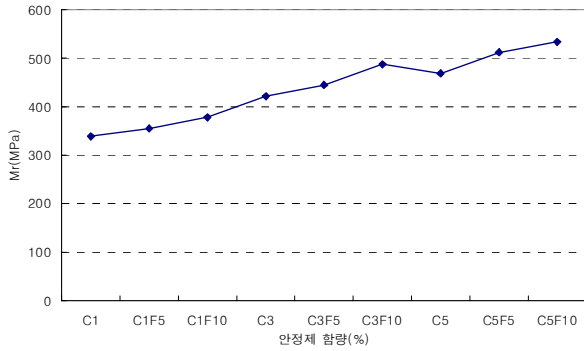
#### 3.1 강화된 지반재료의 강도특성

각 공시체별로 항온항습 조건에서 7일간 양생시킨 후 구속응력과 축차응력을 다르게 하여 반복재하식 회복탄성계수시험을 실시하였고, 회복탄성계수시험이후 일축압축시험을 실시하여 강도 및 강성의 변화 추이를 살펴보았다.

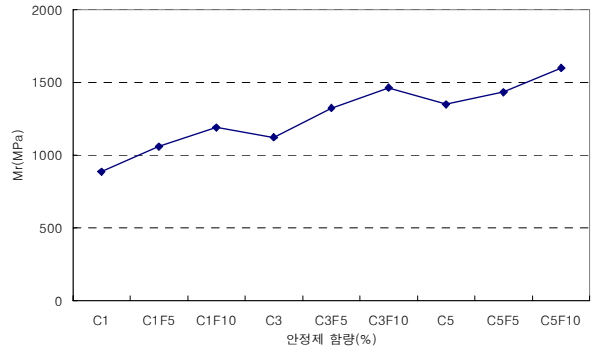
그림 1은 안정제 함량별 강화된 지반재료의 회복탄성계수 변화 추이를 나타낸 것이다. 회복탄성계수는 하중 반복재하시 하부재료에서 실제로 경험하는 지반응력 상태를 고려하여 표 3과 같이 일반적인 응력분포 범위를 정하고 그 범위 안에서 측정된 회복탄성계수의 평균을 취해 선정하였다. 시험결과 안정제 함유량이 증가함에 따라 회복탄성계수는 1.1~1.8배 커지는 경향을 나타내었고, 단독으로 시멘트만 적용한 경우보다 시멘트와 플라이애쉬를 복합안정제로 적용한 경우에 보다 높은 회복탄성계수가 측정됨을 알 수 있었다.

표 3. 교통하중에 의한 도로기초 응력분포(트럭 접지압 689KPa)

구 분	구속응력(KPa)	축차응력(KPa)
노상 상부	13.8 ~ 27.6	27.6 ~ 55.2
보조기층 상부	21 ~ 34	41 ~ 103



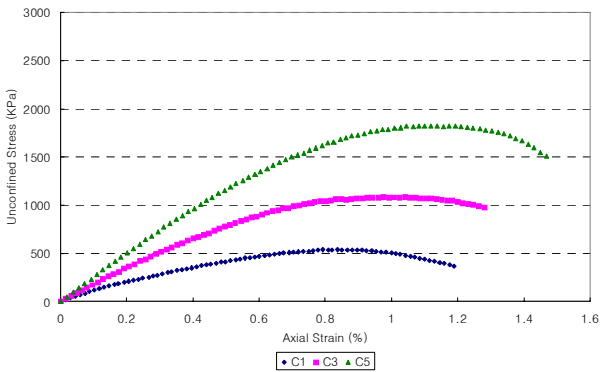
(a) SM



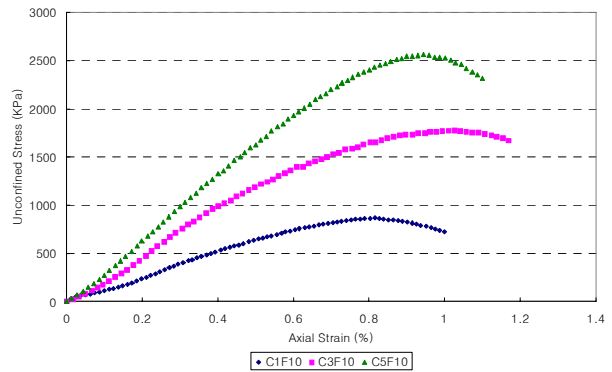
(b) GW

그림 1. 강화된 지반재료의 회복탄성계수 변화 추이

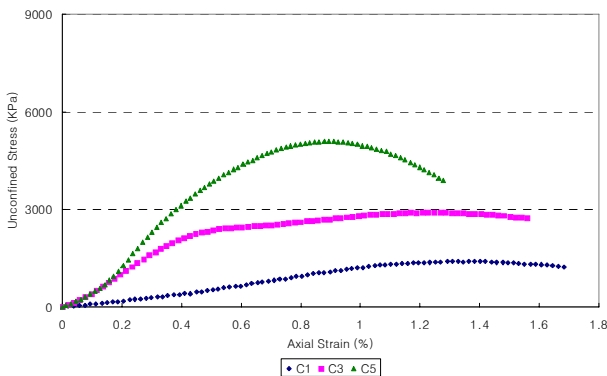
그림 2는 일축압축강도시험을 통한 SM계열 노상재료 및 GW계열 쇄석재료의 안정제 함유량에 따른 응력-변형률 관계를 나타낸 것이다. 강화된 지반재료의 최대일축압축강도는 회복탄성계수와 마찬가지로 안정제 함유량이 증가할수록 커지는 경향을 나타내었다. 단일안정제로 시멘트만 적용한 경우에는 안정제 함유량이 증가함에 따라 2~3.6배의 강도 증가효과를 나타내었으며, 시멘트와 플라이애쉬(10%)를 복합안정제로 적용한 경우에는 단일안정제로 시멘트만 적용한 경우에 비해 1.4~1.8배의 강도증가효과를 나타낼 수 있었다. 따라서 안정제로 시멘트를 단독으로 적용하는 것보다 시멘트와 플라이애쉬를 복합안정제로 적용하는 것이 장기적인 강도측면에서 큰 효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.



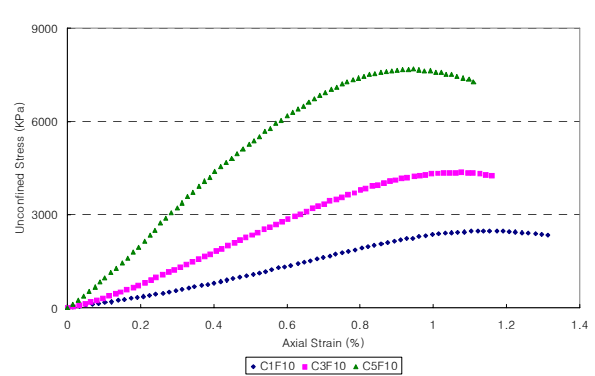
(a) SM(시멘트)



(b) SM(시멘트+플라이애쉬10%)



(c) GW(시멘트)



(d) GW(시멘트+플라이애쉬10%)

그림 2. 강화된 지반재료의 응력-변형률관계

### 3.2 강화된 지반재료의 인성평가

일반적으로 재료의 인성(Toughness)은 재료의 파괴과괴에 대한 저항성을 나타내는 지표로서 보통 파괴 전까지의 하중-변위 곡선 아래 면적 즉 파괴 발생 전까지 흡수되는 에너지양으로 정의 된다. 그림 3의 (a)는 일반재료의 인성특성을 나타낸 것이고, (b)는 지반재료의 인성특성을 나타낸 것이다. 대부분의 지반재료는 최대일축압축강도이후 급격한 시료의 파괴가 발생하기 때문에 일반적으로 최대일축압축강도와 최대축변형률에서의 면적을 구해 인성을 산정하게 된다(Newman 등, 2004). 따라서 본 논문에서는 최대일축압축강도와 축변형률의 면적을 인성으로 산정하기로 하였다.

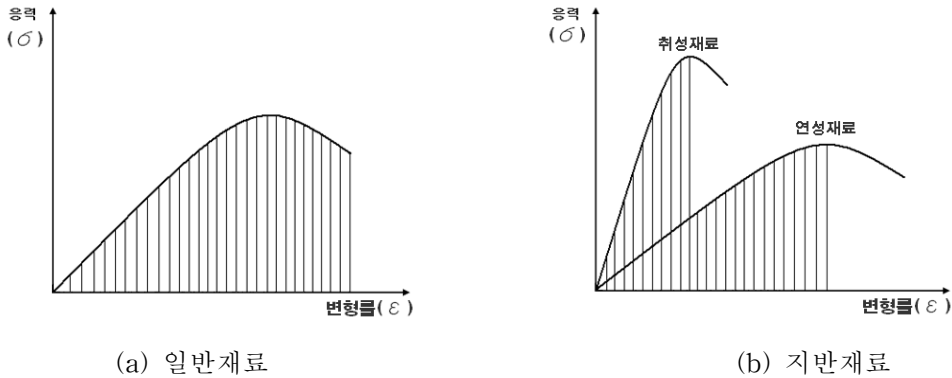


그림 3. 응력-변형률곡선의 인성특성

응력-변형률 곡선으로부터 인성을 구하는 방정식은 식 (1)과 같으며, 인성의 계산은 응력-변형률 곡선으로부터 얻은 회귀분석식의 적분을 통해 면적을 계산함으로써 구할 수 있다.

$$\text{인성}(Toughness) = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

한편, 안정처리시 요구되는 안정제 함량 및 최소일축압축강도는 회복탄성계수시험 결과를 이용 2차원 유한요소법을 통한 구조해석으로 표 4와 같이 제시되었다(건설교통부, 2008). 본 연구에서는 표 4에 근거하여 일축압축강도시험을 통해 구하여진 응력-변형률 곡선의 최대일축압축강도와 축변형률에서의 면적을 구해 인성을 산정해 보았다. 표 5와 같이 강화제 적용에 따른 일축압축강도의 증가효과로 인해 응력-변형률 곡선 아래의 면적, 즉 인성이 증가함을 알 수 있었다. 또한 SM계열의 노상재료에서는 안정제함량 시멘트 3% 와 플라이애쉬 5%, GW계열 쇄석재료에서는 시멘트1%, 플라이애쉬5%에서 1000(KPa·mm)이상의 인성이 산정됨을 알 수 있었는데 이는 강도-변형 측면에서 합리적인 결과를 도출했다고 판단된다.

표 4. 안정처리시 요구되는 안정제함량 및 최소일축압축강도

한계변형률 기준	구 분	최소일축압축강도 (kPa)	안정처리층 최소두께	안정제함량 (%)	양생일수 (일)
장수명포장 (65 $\mu$ m)	보조기층 (GW)	4,000	50cm 이상	C3F5	7
	노상토 (SW, SM)	1,500	불 가		
AI (150 $\mu$ m)	보조기층 (GW)	2,000	20cm 이상	C1F5	
	노상토 (SW, SM)	1,500	20cm 이상	C3F5	

표 5. 안정제 함량별 강화된 지반재료의 인성

구 분	인성(Toughness), KPa · mm	
	노상재료 (SM)	보조기층재료 (GW)
C1	282.08	966.61
C1F5	391.36	1454.09
C1F10	396.05	1406.13
C3	677.82	2693.14
C3F5	1119.95	2663.50
C3F10	1111.20	2598.59
C5	1255.90	2623.21
C5F5	1213.10	4384.76
C5F10	1374.77	4345.70

#### 4. 종합

본 논문에서는 강화된 지반재료에 대하여 반복하중하 회복탄성계수시험 및 일축압축강도시험을 실시하여 안정제 함량에 따른 역학적 특성을 살펴보았으며, 결과를 바탕으로 다음과 같은 부분적인 결과를 간략하게 요약할 수 있다.

- (1) 강화된 지반재료의 회복탄성계수시험결과 안정제 함량이 증가함에 따라 회복탄성계수는 1.1~1.8배 증가하는 경향을 나타내었다.
- (2) 강화된 지반재료의 일축압축강도시험결과 시멘트를 단일안정제로 적용한 경우 보다는 시멘트와 플라이애쉬를 복합안정제로 적용하는 것이 장기적인 강도증가 측면에서 큰 효과를 발휘할 것으로 판단된다.
- (3) 일축압축강도시험을 통해 구하여진 응력-변형률 결과에서 추정할 수 있는 인성을 통하여 지반재료에 대한 피로파괴 저항특성을 간접적으로 평가 할 수 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 “2008년 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구” 중 포장하부구조 시공기준 정립 연구의 일부 결과로, 연구를 가능케 한 국토해양부에 감사드립니다. 아울러 논문의 내용은 국토해양부의 공식적인 내용이나 정책이 포함되어 있지 않음을 밝힙니다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부 (2008), 한국형 포장설계법 개발 및 포장성능 개선방안 연구 2단계 4차년도 최종보고서, “포장하부구조 시공기준 정립”
2. 박성완, 황규영(2008), “도로기초 지반재료의 회복변형 및 응력의존 예측”, 한국도로학회논문집, 제10권, 1호, pp.63-74
3. 사공명, 김대현, 최찬용 (2008), “점성토의 회복 및 영구변형 특성 평가”, 한국철도학회논문집, 제11권 제1호 pp. 61-68
4. AASHTO (1986), AASHTO Guide for Design of Pavement Structure.
5. Newman, K. and J. Tingle (2004), "Emulsion Polymers for Soil Stabilization", FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey, USA.