



노상토 및 보조기층 재료의 변형특성

Deformation Characteristics of Subgrade Materials and Soil at Abutment

송창섭* · 임성윤**†

Song, Chang-Seob* · Lim, Seong-Yoon**†

ABSTRACT

It is very important to select carefully backfill materials and build for the structural integrity of abutment in bridge. In general, backfill materials of unbound crushed stones (SB-1) are used to provide the safety of abutment structure and to reduce differential settlement around abutment that is significantly related with performance of road pavement under working conditions. In this study, to evaluate the compatibility of backfill materials at abutment and to develop the abutment design program, i) basic properties of subgrade soils in Korea, ii) evaluation of deformational characteristics of backfill materials from RC/TS tests, cyclic TX tests and Creep tests were accomplished.

Keywords: Consolidation; CRS test; Strain rate; Preconsolidation pressure; Incremental loading test

I. 서 론

구조물과 성토체와의 경계부분 (뒤채움)은 이질의 재료가 접하게 되어 일체성 확보가 어려우므로 여러 가지 공학적인 문제가 발생할 가능성이 높은 취약구간이다. 구조물과 성토 경계에서 일반적으로 발생 가능한 문제점을 크게 두 가지 형태로 분류해 보면, 하나는 성토체의 시공 및 도로주행과정 조건에서 유발되는 구조물의 손상이고, 다른 하나는 변형특성 차이로 인한 포장체의 연속성 저하에 대한문제이다.

성토체에 의한 구조물의 손상을 줄이기 위해서는 다짐시공 과정 및 완료 후의 토압을 최대한 억제할 수 있는 시공방법과 재료를 사용해야 한다. 이러한 측면만을 고려한 최선의 방법은 시공과정에서 발생하는 다짐유발 토압을 최소화함과 동시에 토공의 재료를 배수성이 뛰어난 재료로 사용하는 것이다. 한편, 포장의 연속성 확보를 위해 부등침하를 최대한 억제하기 위해서는 성토체의 강성도를 구조물의 강성도에 근접하도록 강성도 특성이 좋은 재료를 사용하고 시공과정에서 충분한 다짐이 되도록 해야 한다.

따라서 작은 다짐하중으로도 충분한 다짐이 이루어져 구조물에 대한 손상을 최소화 할 수 있고, 효과적인 다짐이 이루어져 배수성과 강성도 발현이 양호한 입상의 선택층 재료를 뒤채움 재료로 사용하여 오고 있다. 그러나 보조기층과 같은 일반 토공 구간과는 다른 별도의 뒤채움 재료를 사용하는 경우 또 다른 공학적인 문제점을 야기하고 있다.

교대 뒤채움의 경우에도 인접 토공구간과 동일한 양질의 노상토를 뒤채움 재료로 사용하는 것이 가능하다면 별도의 뒤채움 재료를 사용함에 따라 발생하는 여러 문제점들을 개선할 수 있다. 본 연구에서는 일반적인 입상 뒤채움재에 대한 대체재로 노상토 재료를 사용할 경우에 구조물과의 접합부에서의 부등침하 가능성을 평가하기 위해서 노상토 재료의 장기변형 특성을 실험적으로 비교 분석하였다.

II. 노상토의 교대 뒤채움 적용가능성 검토

1. 시방기준

구조물과 성토체의 부등침하를 줄이기 위해서는 성토체가 충분히 다져져서 우수한 장기침하 저항성을 확보하여야 한다. 그러나 배면의 토사를 과하게 다지면 큰 토압이 유발되어서 때로는 구조물에 심각한 손상을 초래하기도 한다. 아울러 구조물이 비대칭으로 존재하는 경우에는 구조물의 한 쪽 측면에만 토압이 작용하여 구조물에 유해한 하중으로 작용하게 되므로 뒤채움재의 배수상태를 유지하여 수압에 의한 토압의 증가가 억

* 충북대학교 지역건설공학과

** 한국도로공사 도로교통연구원 지반팀

† Corresponding author. Tel.: +82-31-371-3344

Fax: +82-31-371-3379

E-mail address: soilab73@naver.com

2010년 4월 7일 투고

2010년 5월 11일 심사완료

2010년 5월 12일 게재확정

Table 1 Standard of backfill material

		Korea Expressway Corporation	MLTM (Korea)	Japan	
Quality standards	Material	-	-	Upper	Lower
	PI	lower than 10	lower than 10	-	-
	Sand equivalent	more than 15	-	-	-
	CBR	more than 10	more than 10	more than 10	more than 5
	Maximum size	lower than 80 m/m	lower than 100 m/m	lower than 150 m/m	lower than 300 m/m
	Passing by No. 4	30 ~ 65 %	25 ~ 100 %	-	-
	Passing by No. 200	2 ~ 10 %	lower than 15 %	-	-
Construction	Compaction thickness of layer	lower than 20 cm	lower than 20 cm	lower than 20 cm	
	Degree of compaction	more than 95 % of γ_{dmax}	more than 95 % of γ_{dmax}	more than 95 % of γ_{dmax}	

MLTM : Ministry of Construction and Transportation (2002)

Table 2 Standard of backfill compaction test (Korea expressway corporation)

			Roadbed		Subgrade	Standard
			Rock	Soil		
Thickness of layer after compaction (cm)			60	30	20	
Degree of compaction (%)				more than 90	more than 95	KSF 2311 KSF 2312
Method of compaction				A, B	C, D, E	KSF 2312
PBT	Asphalt pavement	Settlement (cm)	0.125	0.25	0.25	KSF 2310
		K_{30} (kgf/cm ³)	20	15	20	
	Cement pavement	Settlement (cm)	0.125	0.125	0.125	KSF 2310
		K_{30} (kgf/cm ³)	20	10	15	

제되도록 하여야 한다.

이와 함께 구조물의 표면이 공기 중에 직접적으로 노출되므로 동결이 우려되는 지역에서는 배면토사의 동상을 고려하여야 한다. 만일 토사를 피복하고 있는 구조물의 두께가 작아서 연직면에 대한 동결 깊이가 구조물의 두께 이상이고, 뒤채움재가 동결에 의한 동상에 민감한 재료인 경우에는 동상압이 구조물에 유해한 하중으로 작용하게 된다.

Table 1은 여러 기관에서 적용하고 있는 뒤채움 재료의 품질기준이고 Table 2는 뒤채움 다짐시험 판정기준이다. 노상토는 대체로 입상의 보조기층 또는 선택층 재료에 준하는 품질기준과 다짐기준을 적용하고 있다. 그러나, 현장에서 발생하는 자연토사가 소정의 기준을 만족하는 경우에는 일반 토공부분을 연장하여 적용할 수 있도록 허용하고 있다.

2. 노상토의 교대 뒤채움 적용가능성 분석

일반적으로 교대 뒤채움에 사용하는 노상토는 재료로서의 공학적 특성은 SB-1 (80 mm 보조기층재료) 재료에 비해 부족하지만 노상토 재료로 다짐시공을 하게 되면 주변 토공 부분과 동일한 재료를 사용하게 되므로 시공이 용이하며 다짐 후

의 품질 확보에 유리하다. 그러나 재료 자체의 기초적인 특성이 우수하여도 시공 완료 후의 품질도 우수하다고 단정할 수는 없기 때문에 지속적인 추적조사와 실내시험을 통한 검증이 필요하다.

가. 국내 노상토의 일반적인 특성

국내에서는 노상토 재료의 품질에 대한 요구조건을 시방서에서 규정하고 있기 때문에 대체적으로 매우 우수한 재료가 적용되고 있다. 노상토의 품질 기준은 소요의 다짐도에서 요구되는 역학적 특성치를 확보하기 위한 입도분포의 기준, 시공성의 확보를 위한 최대치수 규정 및 시공시의 함수비 기준, 한층 다짐층 내부의 균등한 다짐도 및 소요의 다짐도 확보를 위한 시공층 두께에 대한 기준이 포함되어 있다.

일반적인 양질의 노상토를 교대 뒤채움 재료로 적용가능한가를 검토하기 위해서, 국내 노상토의 기초적인 특성을 알아 본 결과, 노상토의 시방기준을 만족하는 경우, 일반적인 토공 구간에서 포장하중에 의한 장기침하의 우려는 없는 것으로 알려져 있다(Lee, 1997). 이것은 상부 포장층의 단면에 사용되는 노상토의 품질조건에 합당하도록 결정하여 적용하기 때문이다.

Table 3 Physical properties of subgrade soils

Sample	Material properties								Compaction (D type)	
	D ₉₅ (mm)	#4 passing (%)	#200 passing (%)	C _U	C _C	LL (%)	PI	U.S.C.S	γ_{dmax} (lb/in ³)	OMC (%)
A-1	4.5	95.89	2.91	10.2	1.3	-	N.P	SW	0.074	8.7
A-2	19.0	77.28	2.95	12.0	0.7	27.36	6.13	SP	0.076	9.2
A-3	7.4	92.51	1.28	4.8	0.7	-	N.P	SP	0.071	10.2
A-4	41.0	50.90	3.10	8.8	2.0	40.6	7.6	SW	0.059	19.0
A-5	7.9	83.70	1.28	6.67	1.44	-	NP	SW	0.073	10.5
A-6	16	86.00	2.90	11.53	0.63	34.9	4.9	SP	0.063	17.9

Table 4 Physical properties of crushed stones

Sample	Material properties							Compaction (E type)	
	D ₉₅ (mm)	#4 passing (%)	#200 passing (%)	C _U	C _C	PI	U.S.C.S	γ_{dmax} (lb/in ³)	OMC (%)
B-1	24.0	45.69	0.90	28.0	3.0	N.P	GW	0.083	6.4
B-2	34.0	51.90	0.20	24.3	0.4	N.P	SP	0.081	6.7
B-3	27.0	37.71	0.70	35.3	2.4	N.P	GW	0.087	6.8
B-4	36.5	37.37	0.30	63.7	0.9	N.P	GP	0.084	6.5
B-5	31.0	48.89	0.10	21.8	1.4	N.P	GW	0.084	6.5
B-6	31.0	43.40	1.70	9.8	1.5	N.P	GW	0.082	8.0

III. 재료 및 방법

1. 시험시료

시험대상 시료는 크게 3종류를 적용하였다. 하나는 크리프 특성의 해석적 검토를 위한 폴리우레탄 재질의 검증시편이고, 또 하나는 현재 뒤펀 재료로 널리 사용되고 있는 입상 재료이며 나머지는 뒤펀 재료로 대체 가능성을 검토하고자 하는 노상토 재료이다.

검증시편은 강성의 크기 시간의존 장기변형 특성이 서로 다른 6종을 적용하였다. 입상 뒤펀 재료와 노상토 재료에 대해서도 각각 6종에 대하여 시험을 수행하였다. 입상재료와 노상토 재료는 실제 고속도로 현장에서 시공되고 있는 재료를 채취하였다. Table 3 및 Table 4는 시험에 사용한 노상토 및 보조기층 뒤펀 재료의 기초물성 특성을 정리한 것이다.

2. 시험방법

가. 공진주/비틀전단시험

본 연구에서 적용한 공진주/비틀전단시험 장치는 Fig. 1과 같다. 본 시험은 뒤펀 재료의 탄성변형 특성과 감쇠비 특성을 평가하기 위하여 적용하였다. 공진주시험은 시편의 바닥을 고정시키고 코일-자석 시스템을 이용한 진동시스템 (drive system) 을 시편의 상부와 연결하여 진동시 진동판에 부착된 가속감지기

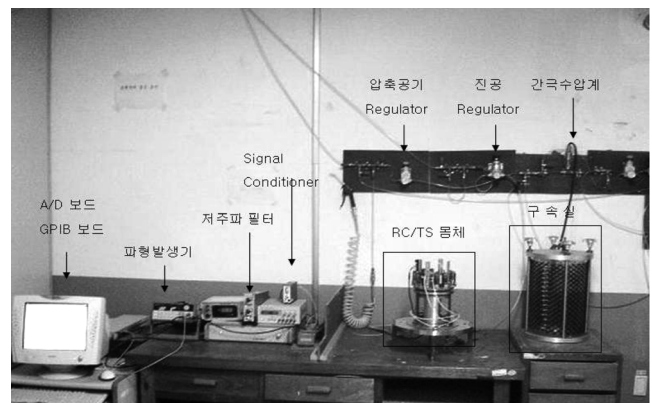


Fig. 1 Equipment of resonant column and torsion

(accelerometer)로 가속도를 측정하였다. 직경 150 mm, 높이 250 mm의 공시체에 진동수를 바꿔가면서 비틀자극 (torsional excitation)을 가하여 공진주파수 (f_r)와 진동의 크기 (A_r)를 구한 후, 실험기의 특성 및 시편의 크기와 무게를 이용하여 전단 파속도 (V_s), 전단탄성계수 (G) 및 전단변형률 (γ)을 구하였다. 구속압은 20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 150 kPa, 300 kPa으로 가하였다.

비틀전단시험은 공진주시험과 동일한 시험장치를 사용하고, 작동방법을 달리하여 변형특성을 결정하는 반복재하시험이다. 공시체를 바닥에 고정시키고 시편 상부와 연결된 진동 시스템에 10 Hz 미만의 고정된 주파수로 반복 비틀력을 가하여 공진주파

수를 구하는 대신 시편에 가해진 비틀력-비틀각 관계를 측정하여 응력-변형 이력곡선을 구하였다. 비틀각은 간격측정기를 이용하여 측정하고, 비틀력은 시험기 제작시 검증된 가진전압과 비틀력의 관계를 사용하여 시료에 가해진 가진전압의 크기를 측정하여 획득하였다. 전단탄성계수는 응력-변형 이력곡선의 두 끝점을 연결한 직선의 기울기로부터 결정할 수 있고, 아울러 응력-변형 이력곡선의 면적을 이용하여 감쇠비를 결정할 수 있다. 가진전압의 크기를 변화시키면 전단변형율이 변화하여, 변형율 크기에 따른 전단탄성계수를 결정할 수 있다. 또한 동일한 가진전압 크기에서 하중주파수를 변화시키며 시험을 수행하여 하중주파수에 따른 탄성계수의 변화를 검토할 수 있는 시험장치이다.

나. 삼축압축시험

본 연구에서 사용한 삼축압축시험장치는 Fig. 2와 같고, 삼축 크리프 시험에서는 Fig. 3과 같은 하중을 적용하였다. 공시체는 직경 100 mm, 높이 200 mm로 하였다. 축하중은 변형을 제어 방식으로, 구속응력은 공기압으로 재하하는 시스템이다. Table 5는 삼축압축시험의 하중조합을 나타낸 것이다. 10-2 % 변형을 범위까지 신뢰성 있는 시험이 가능하도록 전기식 LVDT와 Load Cell을 사용하여 하중과 변위를 측정하였다. 외부변위



Fig. 2 Triaxial cell

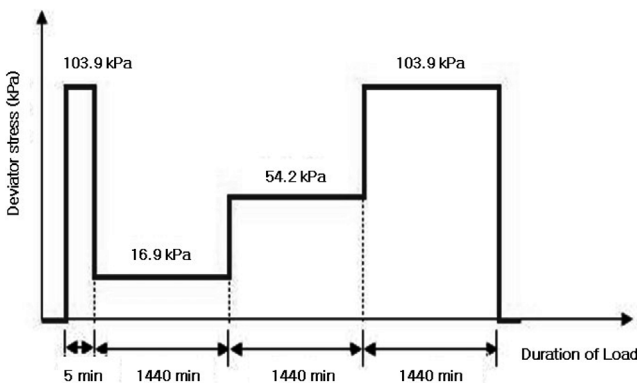


Fig. 3 Load combination of triaxial-creep test

Table 5 Load combination of tri-axial test

Confining pressure (kPa)	No. of cycling	Deviator stress (kPa)	
		Loading	Unloading
104	2	0 → 104	104 → 0
21	2	0 → 69	69 → 0
69	2	0 → 207	207 → 0
138	20	0 → 276	276 → 0

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

측정방법을 적용하는 경우에 변형률 측정의 가장 큰 오차 요인인 단부오차를 최대한 제거하고자 시료의 단부를 석고로 처리하여 시험을 수행하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 탄성 변형특성 및 동적 변형특성

교통하중, 상부 구조물 하중, 토사의 상재하중 등이 작용할 때 뒤채움 부분의 변형은 탄성침하, 반복하중에 의한 침하, 장기 크리프 특성에 따른 침하로 나누어 볼 수 있다. 본 연구에서는 공진주/비틀전단시험을 통하여 뒤채움 재료의 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 특성을 평가하였다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 노상토의 평균적인 최대 전단탄성계수는 167.0 MPa, 보조기층 재료의 경우에는 208.6 MPa로 평가되었다. 이러한 결과만을 놓고 본다면 보조기층 재료로 뒤채움 시공하는 경우탄성침하량은 노상토 재료로 뒤채움을 하는 경우에 비하여 20 % 정도 작게 발생할 것으로 예상된다.

Fig. 5에 나타낸 감쇠비는 노상토 재료의 경우가 보조기층 재료에 비하여 큰 값을 갖는 것으로 평가되었다. 최소감쇠비는 노상토의 경우 3.4 %, 보조기층 뒤채움 재료의 경우 2.5 %의 평균값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 뒤채움 다짐시공에 동일한 다짐장비가 사용되고, 동일한 다짐방법을 적용하는 경우 구조물에 전달되는 토압은 노상토를 뒤채움 재료로 사용하는 경우가 보조기층 재료를 사용하는 경우에 비하여 작을 것으로 예상된다.

Fig. 6은 B-1시료에 대하여 반복재하 삼축압축시험에서 얻어진 응력-변형률 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 알려진 바와 같이 하중재하횟수가 증가함에 따라 소성변형이 계속적으로 누적되고 있음을 알 수 있다.

하중재하횟수에 따른 누적 소성 변형률의 증가정도 (Fig. 7에서 기울기)는 축차응력 크기에 무관하게 일정하게 결정됨을 발견할 수 있다. 이것은 하중반복횟수에 따라서 소성변형은 계속적으로 누적되지만 응력-변형률 곡선의 형태는 동일한 형태를 유지하여 탄성계수는 하중반복횟수에 무관하게 일정한 값을

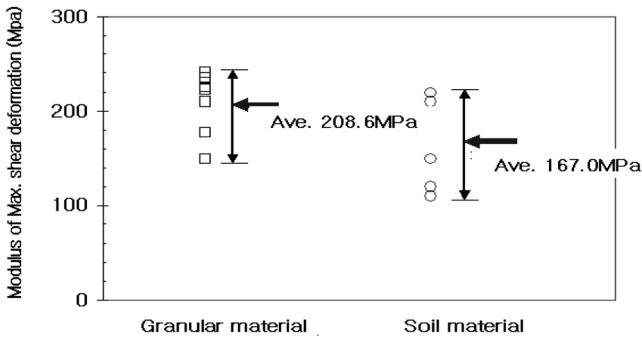


Fig. 4 Modulus of elasticity with backfill material

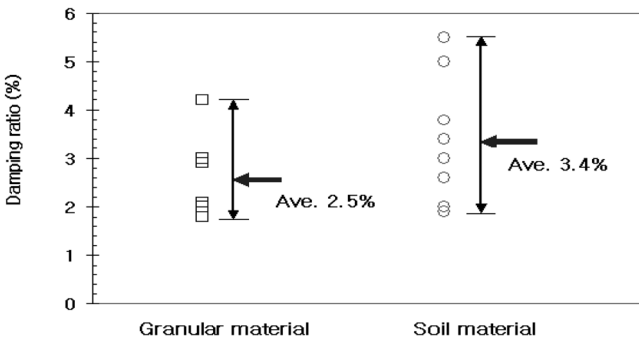


Fig. 5 Damping ratio with backfill material

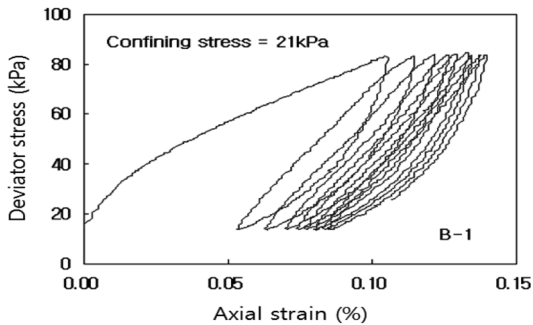


Fig. 6 Strain-stress with repeated loading

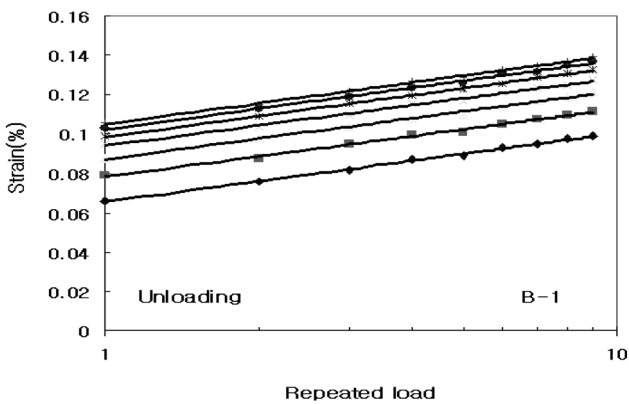


Fig. 7 Plastic strain with repeated loading

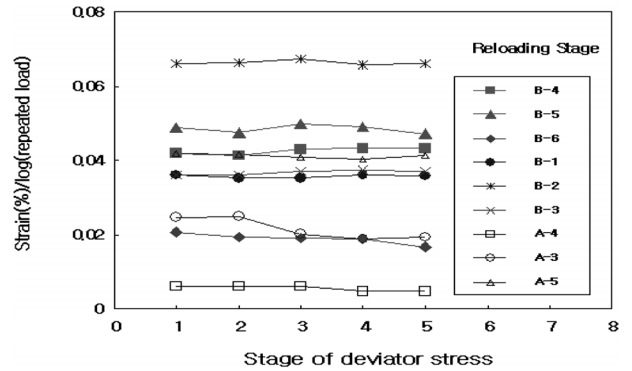


Fig. 8 Strain / Repeated load with stage of deviator stress

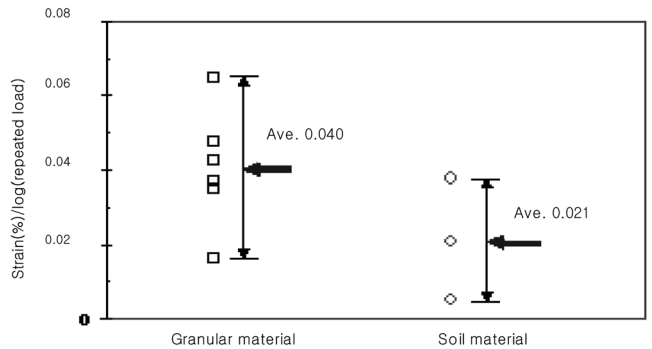


Fig. 9 Repeated load with backfill material

갖게 됨을 의미한다.

Fig. 7에 나타난 결과를 반대수 회귀분석하여 각 축차응력 단계에서 하중재하횟수에 따른 변형량의 증가정도를 결정하였다. 하중 재하단계 및 하중 제하단계에서 결정된 하중반복횟수의 영향정도를 정리하여 그림으로 나타내면 Fig. 8과 같다.

하중반복횟수의 영향 정도를 뒤채움 재료에 따라서 정량적으로 검토해보면, 노상토 뒤채움 재료의 경우에는 0.021 [변형률 (%) / log (반복횟수)], 보조기층 뒤채움 재료의 경우에는 0.040 [변형률 (%) / log (반복횟수)]로, 보조기층 뒤채움 재료의 경우가 노상토 뒤채움 재료에 비하여 2배 가까이 크게 평가되었다 (Fig. 9).

2. 장기 변형특성

뒤채움 재료에 대한 삼축 크리프 시험결과를 탄성변형량으로 정규화하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에 의하면 시험에 사용된 노상토 및 부순자갈도 상당량의 점성변형을 한다는 것을 알 수 있다. 물론, Fig. 10의 결과는 탄성변형으로 정규화된 것이기 때문에 장기변형의 절대량을 나타내는 것은 아니다. 장기적인 점성변형의 절대량으로 표현하고자, 총 변형에서 탄성변형을 제외한 점성변형만을 나타내면 Fig. 11과 같다. Fig.

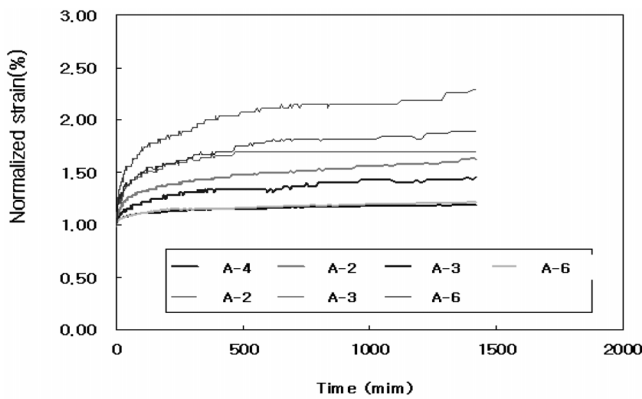


Fig. 10 Long time behavior

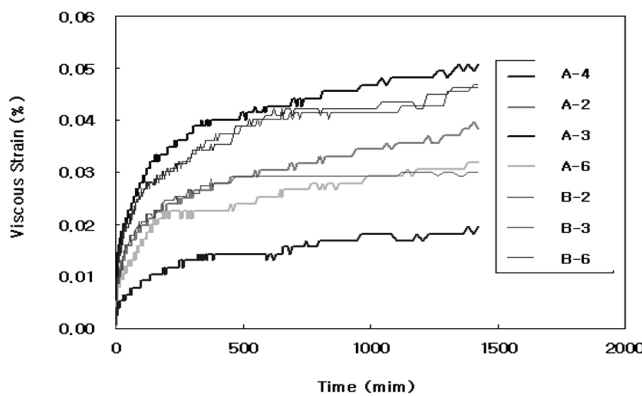


Fig. 11 Strain of viscosity

11의 결과는 동일한 축차응력 단계에서의 결과를 비교 한 것이다. 즉, 동일한 상재하중이 작용하는 경우 시간의존 장기변형 특성을 나타낸 것으로, 전반적으로 노상토 재료와 보조기층 재료의 장기변형 특성에는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

V. 결 론

노상토 재료와 입상 뒤채움 재료의 장기 변형특성을 비교하기 위하여 삼축압축, 일축압축, 공진주 및 비틀전단시험을 실시하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 노상토의 평균적인 최대 탄성계수는 167.0 MPa, 보조기층 재료의 경우에는 208.6 MPa로 노상토 재료에 비하여 20 % 정도 크게 평가되었다. 따라서 보조기층 재료로 뒤채움 시공하는 경우 탄성침하량은 노상토 재료로 뒤채움을 하는 경우에 작게 발생할 것으로 예상된다.

2) 감쇠비는 노상토 재료의 경우가 보조기층 재료에 비하여 큰 값을 갖는 것으로 평가되었다. 최소감쇠비는 노상토의 경우 3.4 %, 보조기층 뒤채움 재료의 경우 2.5 %의 평균값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 뒤채움 다짐시공에 동일한 다짐장비

가 사용되고, 동일한 다짐방법을 적용하는 경우 구조물에 전달되는 토압은 노상토를 뒤채움 재료로 사용하는 경우가 보조기층 재료를 사용하는 경우에 비하여 작을 것으로 예상된다.

3) 하중반복횟수의 변형에 대한 영향은 축차응력 단계에 무관하게 일정하게 나타났고, 보조기층 재료의 하중 반복횟수에 대한 영향이 노상토 재료에 비해 크게 나타났다. 이러한 결과는 반복하중의 영향만을 고려한다면 보조기층 재료 뒤채움이 노상토 재료 뒤채움에 비하여 더 많은 부등침하를 유발할 가능성이 있다는 것을 의미한다.

4) 입상의 보조기층 재료의 경우에도 상당한 점성변형을 가지고 있는 것으로 평가되었으며, 노상토 재료와 유사한 정도로 나타났다. 따라서 크리프에 의한 장기침하 문제에 있어서는 입상의 재료와 노상재료가 유사한 특성이 있는 것으로 판단된다.

이 논문은 2008학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음 (This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2008)

REFERENCES

1. Ministry of Construction and Transportation, 2002. Korea pavement research program, KPRP-G-02,
2. Ministry of Construction and Transportation, 2000. Road design manual.
3. Lee, K. H., 1997. Development of alternative MR testing methods for subgrade and sub-base materials, Korea expressway corporation.
4. AASHTO, 1986. AASHTO Guide for Design of Pavement Structure, AASHTO, Washington, D.C. 1986
5. AASHTO, 1992. Resilient Modulus of Unbounded Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P-46 AASHTO, T-294-92I, AASHTO, Washington D.C..
6. AASHTO, 1993. AASHTO Guide for Design of Pavement Structure, AASHTO, Washington, D.C..
7. Duncan, J. M., Clough, G. W. and Ebeling, R. M., 1990. Behavior and Design of Gravity Earth Retaining Structures, Proceedings of the Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, *ASCE Geotechnical Special Publication 25*: 251-277 (New York).

8. Filz, G. M. and Duncan, J. M., 1992. An experimental and analytical study of earth loads on rigid retaining walls, *Geotechnical Engineering Division*, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
9. Gomez, J. E., 2000. Development of an extended hyperbolic model for concrete-to-soil Interfaces, *Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia*.
10. Kim, D. S., and K, K. C., 1996. A reliable resilient modulus testing technique on subgrade soils. *Journal of the Korean Society of civil Engineers* 16: 81-91 (in Korean).
11. Kim, D. S., and C, Y. O., 2001. Dynamic deformation characteristics of cohesionless soils in Korea using resonant column tests. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 17: 115-128 (in Korean).
12. Reeves, J. N. and Filz, G. M., 2000. Earth force reduction by a synthetic compressible inclusion, A Report of Virginia's Center for Innovative Technology.
13. Sehn, A. L., and Duncan, J. M., 1990. Experimental study of earth pressures on retaining structures, *Geotechnical Engineering Division*, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
14. Su, W., 1989. Static strength evaluation of cohesionless soil with oversize oarticles, *Ph.D Dissertation, Washington State University*.
15. Sun, C. W., 1993. Stiffness and damping from the frequency response of a free-free specimen, Master's Thesis GT93-8, The University of Texas at Austin.
16. Vaghela, J. G. and Stokoe II, K. H., 1995. Small-strain dynamic properties of dry sand from the free-free resonant column, Geotechnical Engineering Report GT95-1, Geotechnical Engineering Center, University of Texas at Austin.