

암버력 쌓기 모형실험에 의한 최적 암버력 쌓기 공법 제시

황세환*, 우동진**, 손의권*, 최명진**

1. 서론

암쌓기에 있어서 재료의 입경 분포 및 시공형태는 시공성과 시공 후 토체의 안정성에 큰 영향을 미친다. 그중 암버력을 쌓기 재료로 사용하여 시공하는 경우에 대해서는 일반적인 쌓기의 경우와 다른 시공법이 제안되어 있다. 최근 발주되는 터키설계 규모의 토목 사업에서는 터널 및 사면 절취 등의 과정에서 암버력이 많이 생산되고 그것을 활용하여 공사구간의 절취 구간에 사용하는 방안이 일반화 되었다.

그러나 최근 설계된 여러 과업들의 도로 노체부 암버력 쌓기의 형태를 보면 설계자마다 설계 적용한 기준들에 일관성이 부족함을 발견하였다. 그러한 설계안들의 상이한 부분들을 비교해보면 입도조절층(필터층)의 제원과 암버력의 허용최대입경으로 크게 2가지 요소로 분석된다. 그리고 이 두 가지 요소는 시공비용과 시공 후 암쌓기 부분의 안정성과 품질에 영향을 미치는 변수로서 작용한다.

본 연구는 터널(NATM)과 도로가 복합된 설계

과업중 터널 발파과정에서 생산되는 암버력을 도로 노체 쌓기에 활용함에 있어 체체의 안정성을 확보함과 동시에 시공성과 비용절감의 효과를 거둘 수 있는 암버력 쌓기 시공형태를 제안하는 것이다. 이를 위해서 설계 대상 현장에서 높은 쌓기의 암버력 쌓기 단면을 선정하여 실내 모형실험을 통해 최적의 암버력 쌓기 단면을 제안하였다.

2. 암버력 쌓기 관련 각종 시공 기준 비교

2.1 시방기준 비교 검토

국내에서 암버력 쌓기 시공법에 대한 내용을 포함하고 있는 기준서 4종의 내용을 다음과 같이 비교해 보았다(표 1 참조).

① 암버력 입경기준

최대 600mm에서 300mm 범위로서 각 기준마다 차이가 있으며 중간복토 및 필터층의 사용 여부와 형태 또한 차이가 있으나 최근 설계된 형태를 보면

*1 현대산업개발 토목설계팀

**2 주식회사 유니백 지반팀(uikwuns@hanmail.net)

**3 (주)네스지오 대표이사



표 1. 암버력 쌓기 관련 각종 시공 기준 비교

구 분	재료 최대 입 경	성 토		다 짐		상부노체 두께	
		1층다짐 두께	중간복토 규 정	다짐장비	다짐관리 규 정		
관 련 공 사 시방서	도로설계편람 (00. 건설교통부)	60cm이하	60~90cm	입상재료 소일시멘트층	대형진동 다짐장비	규정 없음	60cm
	고속도로공사 전문시방서 (00. 한국도로공사)	60cm이하	60cm이하	규정 없음 다짐장비	대형진동 시험관리	재하	60cm
	토공관리지침 (97. 한국도로공사)	30cm이하	60cm이하	암, 일반재료 교차시공	대형도자 진동다짐조합	상대밀도 시험관리	60cm
	철도공사 전문시방서(1999)	30cm이하	60~90cm	입도조절 중간층	진동다짐 (진동로울러)	재하 시험관리	
암버력입도분포 (토공관리지침)	입경별 구분(mm) 시방입도(%)	600 90~100	200 60~90	100 45~75	2 20~43	NO.4 0~15	
입도조절중간층 (철도공사전문시방서)	$\frac{R_{15}}{F_{85}} < 5, \frac{F_{15}}{M_{15}} > 5, \frac{F_{15}}{M_{85}} < 5$ R ₁₅ : 암버력재료의 15%통과입경 F ₁₅ : 입도조절중간층 재료의 15%통과입경 F ₈₅ : 입도조절중간층 재료의 85%통과입경 M ₁₅ : 세립재의 15%통과입경 M ₈₅ : 세립재의 85%통과입경						

철도공사전문시방서에서 제시하고 있는 입도조절중간층(Filter층)의 입도분포 범위를 적용한 경우가 많다.

② 암버력 암종

암버력의 최대 입경은 사용되는 암버력의 암종에 영향을 받기도 한다. 쌓기 재료로서의 암버력의 암종으로는 세일, 실트스톤, 천매암, 편암 등의 침수 및 풍화에 민감한 암종의 암버력을 사용하지 않도록 하거나 사용할 경우 30cm 이하의 직경으로 제한하고 있다. 본 연구 대상 지반의 암종은 안산암질로서 암버력 쌓기 재료로서는 적당한 암종이다.

③ 공극채움재 사용

시공시 암버력을 하차하여 포설하는 과정도 시공

품질에 영향을 주는데, 그 중 한 요소가 공극채움재의 사용이다. 도로공사의 토공관리지침에서는 다음 그림 1의 형태로 공극채움재 사용을 기술하고 있다. 공극채움재의 사용은 암버력이 하차되어 다짐에 들어가기 전 암버력을 고르게 포설하는 과정에서 일반 토사가 암버력 사이의 큰 공극을 메우는 효과를 거두기 위해서 사용하며, 또한 포설된 암버력 위로 시공장비의 주행성을 확보하기 위한 목적도 있다.

④ 입도조절중간층(필터층)

입도조절중간층과 필터층을 같은 의미로 사용한 경우가 대부분이며, 이 두 가지 의미를 구분하여 사용한 경우도 있다. 구분하여 사용할 경우 노체상단에 입도조절중간층과 필터층을 나누어 도식화한 경

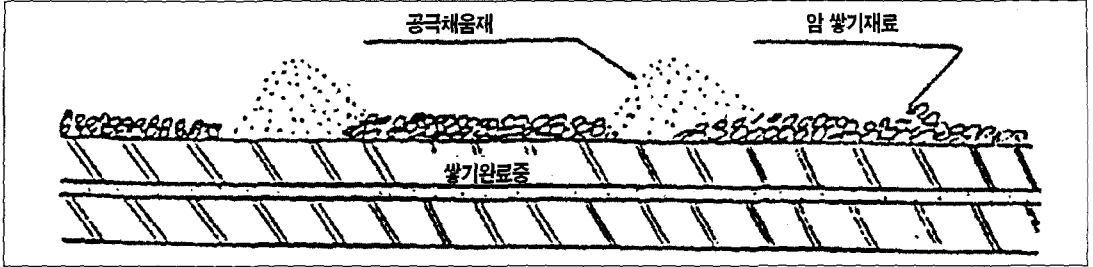


그림 1. 공극채움재와 암쌓기 재료의 포설 형태

표 2. 입도조절중간층(필터층)

출처	필터 조건
Bartram (1940)	$\frac{D_{15}(\text{filter})}{D_{85}(\text{soil})} \leq 4\sim 5, \frac{D_{15}(\text{filter})}{D_{15}(\text{soil})} \geq 4\sim 5$
	$\frac{D_{15}(\text{rock})}{D_{85}(\text{filter})} \leq 4\sim 5, \frac{D_{15}(\text{rock})}{D_{15}(\text{filter})} \geq 4\sim 5$

우도 있다. 필터조건에 대해서는 위에서 제시된 철도공사 전문시방서의 내용과 유사하나 표 2와 같이 Bartram(1940)이 제시한 필터조건도 있다.

3. 암버력 쌓기 기존 설계 형태 검토

최근 1년간 설계된 도로토공 관련 보고서의 내용 중 암버력 쌓기 단면구성의 주요 설계변수는 다음과 같이 도식화 될 수 있다.

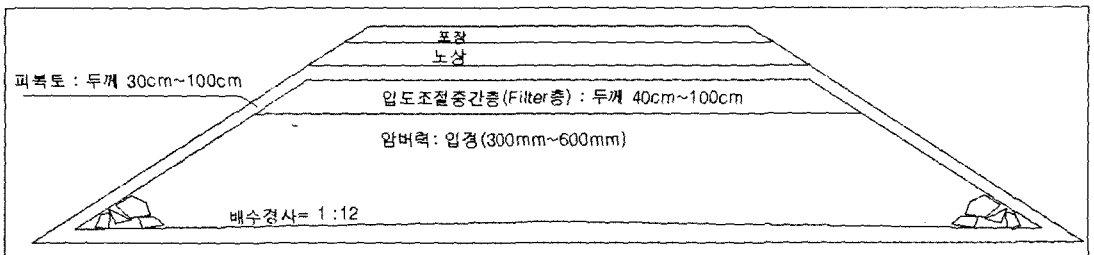


그림 2. 암버력 쌓기 단면 계원

상기에 표기한 제원들은 참고한 각 설계 단면들 중 가장 작은 값과 큰 값을 표시한 것으로서, 각 설계 별로 큰 변동폭을 가지고 있다.

암버력 입경의 경우는 각 시방서에서 규정하고 있는 300~600mm범위를 유지하고 있으나 입도조절중간층 및 피복토 두께의 경우에는 큰 편차를 보이고 있다. 암버력이 쌓기 재료로 활용될 때 300mm~600mm의 허용입경을 만족해야 한다. 하지만 현장조건에서 발생하는 암버력은 이러한 조건을 항상 만족할 수 없기 때문에 암버력의 평균입경이 클 경우 추가적인 소할이 필요하게 되고 이것은 전체 공사비용에 영향을 미친다.

그리고 입도조절중간층의 경우 두께를 크게 하면 좋은 시공품질을 얻을 수 있을 것으로 예상되지만, 시공두께의 상하한선을 제시할 필요가 있으며, 40cm의 두께를 제시한 설계도 있으나 가장 일반적으로 많이 사용된 값은 60cm와 100cm이다.



피복토의 경우, 전체적인 제체의 안정성에는 크게 영향을 미치지 않는 요소이며, 그 두께를 100cm로 제시한 경우도 있으나 일반적으로 가장 많이 사용한 값은 30cm, 60cm이다.

원 및 특성이라고 판단된다. 본 연구에서는 이 두 가지 설계변수의 역할을 다음과 같은 실내 모형실험을 통해 확인하였다.

4. 암버력 쌓기 모형실험

4.1 개요 및 목적

앞 절에서 검토한 바와 같이 암버력 쌓기에 있어 시공성, 경제성, 시공품질 면에서 주요한 설계변수는 암버력의 직경과 입도조절중간층(필터층)의 제

4.1.1 과업수행흐름도

그림 3 참조

4.2 실험의 이론적 배경

4.2.1 포장 도로의 진동특성

- 1차적으로는 차량 자체가 가지고 있는 엔진 진동, 회전 축계의 불평형력, 그리고 자동차의 서스펜션 시스템의 고유진동수와 관련된 진동이 있음

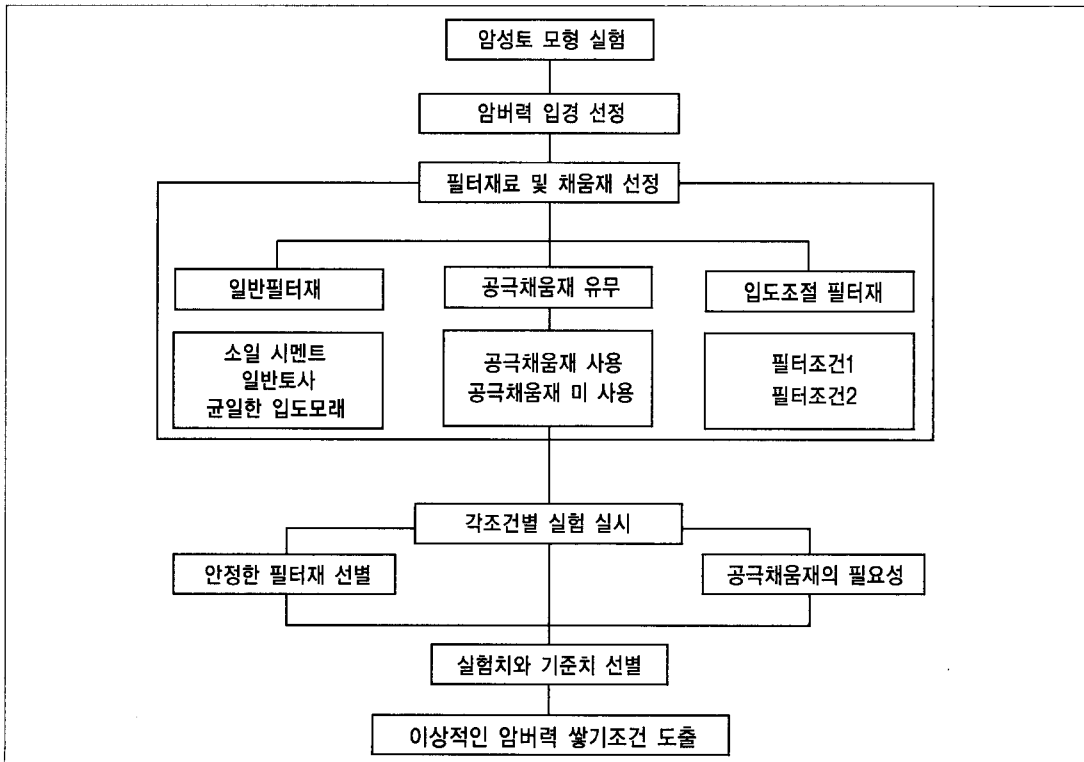


그림 3. 과업수행흐름도

- 차량의 주행 중에 발생하는 진동으로는 타이어의 공기역학적인 압력 변화에 따른 진동과 노면의 불평탄성으로 기인하는 다양한 성분의 진동이 발생
- 차량의 주행에 따른 진동의 특성은 10~30Hz의 주파수 성분이 지배하는 것은 지반 특성과 타이어 사이의 상호작용에 기인

4.2.2 차량 주행속도와 진동

- 차량 주행으로 인해 발생하는 진동에 대한 자료는 1970년대에 일본 건설성 토목연구소에서 교통진동에 대하여 조사한 자료를 참고로 정리

4.2.3 진동가속도

- 평탄성이 좋은 포장도로의 노면에서 수직방향 가속도는 대형차가 통행할 경우, 산을 깎아서 만든 지반조건이 양호한 도로에서는 5cm/sec² 미만, 연약 지반에서는 10cm/sec² 이하

4.2.4 가속도 거리별 감쇠율

- 가속도의 감쇠율에 대해서는 그림 4에 보인 바와 같이 평균 20m 떨어지면 가속도는 반 이하로 되고, 40m까지 비슷한 감쇠율로 감소하나 40m 이상 떨어지면 감쇠율이 둔화됨

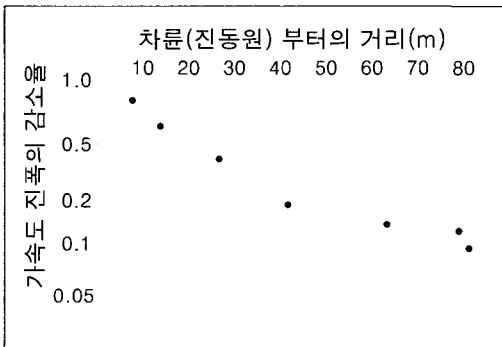


그림 4. 차량 지반진동의 평균 거리감쇠율

- 거리별 에너지 감쇠율에 큰 채적파의 에너지가 40m 이상 떨어진 곳에서는 거의 영향을 못미치고, 표면파만이 전파되기 때문

4.2.5 주행속도 증가에 따른 진동레벨의 변화

- 주행속도에 의한 진동레벨은 그림 5에서 평균적으로 10km/hr 당 약 2~3dB 정도 상승
- 소형차는 대형차에 비해 진동레벨이 10dB 정도 차이가 있으며, 60dB를 넘어가는 경우가 거의 없는 것으로 보고 됨

4.2.6 차량 가진력

표 3 참조

4.3 상사법칙

4.3.1 1g 진동대 실험에 대한 상사법칙

본 연구에 적용한 1g 진동대에 대한 상사법칙은 Iai(1990)의 연구결과를 이용하였다.

- 건조한 흙입자에 대한 기본방정식

$$L^3\sigma + \rho g = \rho u \text{ (평형방정식),}$$

$$De = Ldu \text{ (변위-변형률관계)} \quad |$$

$$Dde \text{ (구성법칙)}$$

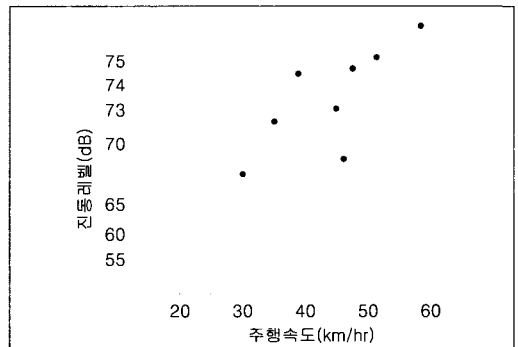


그림 5. 주행속도와 진동레벨



여기서, $\sigma = (\sigma_{11} \sigma_{11} \sigma_{11} \sigma_{12} \sigma_{23} \sigma_{31})$: 응력
 $\epsilon = (\epsilon_{11} \epsilon_{11} \epsilon_{11} \epsilon_{12} \epsilon_{23} \epsilon_{31})$: 변형률,
 $u = (u_1 u_2 u_3)$: 변위 D : 접선탄성계수,
 g : 중력가속도,
 ρ : 밀도, L : 미분연산자 $\lambda_\epsilon = \lambda \left[\frac{(V_s)_m}{(V_s)_p} \right]^2$

여기서, $(V_s)_m$ 과 $(V_s)_p$ 은 각각 모형지반과 원형지반의 전단파 속도이다. $\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}$

4.4 실험단면 및 조건

4.4.1 도로 진동하중 실험단면

그림 6 참조

4.4.2 실험 조건

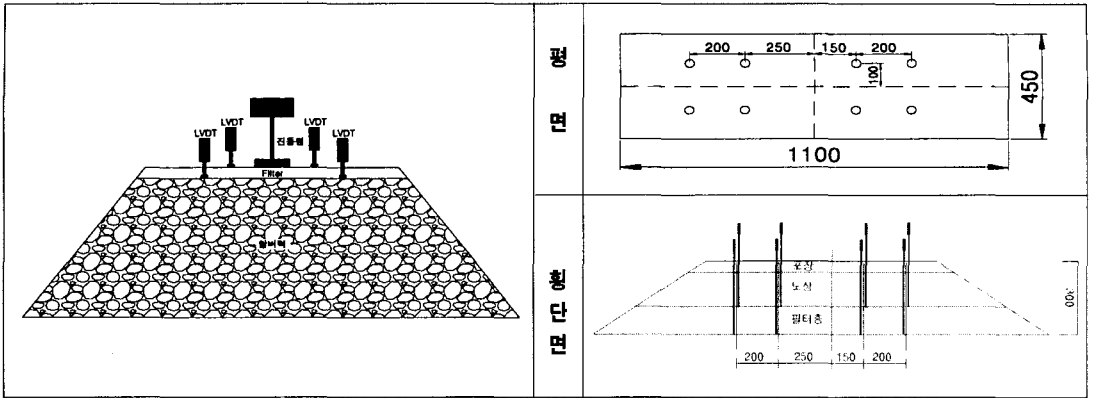
표 5 참조

표 3. 차량 가진력

40톤 대형차량 10km/hr 주행, 정차, 발차시 발생할 수 있는 최대 충격력	• Shock Shape : Half sine (0.1G) • Shock Amplitude : 40000N	• Time Duration : 250ms
32톤 트럭 10km/hr 주행, 정차, 발차시 발생할 수 있는 최대 충격력	• Shock Shape : Half sine (0.1G) • Shock Amplitude : 32000N	• Time Duration : 250ms
4톤 트럭 10km/hr 주행, 정차, 발차시 발생할 수 있는 최대 충격력	• Shock Shape : Half sine (0.1G) • Shock Amplitude : 2000N	• Time Duration : 250ms

표 4. 1g 진동대 실험에 대한 상사법칙

물리량	상사비(원형/모형)			
	일반화된 상사비	실제 사용되는 상사비		
		제1형태	제2형태	제3형태
		$\lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}, \lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = 1, \lambda_\rho = 1$
길이	λ	λ	λ	λ
밀도	λ_ρ	1	1	1
시간	$(\lambda \lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda \lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
가속도	1	1	1	1
속도	$(\lambda \lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda \lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
변위	$\lambda \lambda_\epsilon$	$\lambda \lambda_\epsilon$	$\lambda^{1.5}$	λ
응력	$\lambda \lambda_\rho$	λ	λ	λ
변형률	λ_ϵ	λ_ϵ	$\lambda^{0.5}$	1
강성	$\lambda \lambda_\rho / \lambda_\epsilon$	$\lambda / \lambda_\epsilon$	$\lambda^{0.5}$	λ
투수계수	$(\lambda \lambda_\epsilon)^{0.5} / \lambda_\rho$	$(\lambda \lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
간극수압	$\lambda \lambda_\rho$	λ	λ	λ
휨강성	$\lambda^5 \lambda_\rho / \lambda_\epsilon$	$\lambda^5 / \lambda_\epsilon$	$\lambda^{4.5}$	λ^5
축강성	$\lambda^3 \lambda_\rho / \lambda_\epsilon$	$\lambda^3 / \lambda_\epsilon$	$\lambda^{2.5}$	λ^3
모멘트	$\lambda^4 \lambda_\rho$	λ^4	λ^4	λ^4
전단력	$\lambda^3 \lambda_\rho$	λ^3	λ^3	λ^3
축력	$\lambda^3 \lambda_\rho$	λ^3	λ^3	λ^3



암버력 및 Filter층

계측 설치 제원

그림 6. 도로 진동하중 실험단면

표 5. 도로 진동하중 실험조건

실험 조건	토공구상(필터층 포함 노재부)		실험단면 수	비고
	암버력 설치 범위	Filter 조건		
Case-1 (공극채움재사용)	F-1(Soil-Cement)	φ300mm 범위	1조건	토공기준의 다짐적용
	F-2(일반토사)		2조건	
	F-3(모래)		3조건	
	F-4(굵은필터재)		4조건	
Case-2 (공극채움재없음)	F-1(Soil-Cement)	φ300mm 범위	1조건	
	F-2(일반토사)		2조건	
	F-3(모래)		3조건	
	F-4(굵은필터재)		4조건	
Case 3(공극채움재 사용)	φ300mm 범위	5조건	1	
Case 4(공극채움재 없음)	φ300mm와 φ600mm 범위 혼용	5조건	1	

표 6. 도로 진동하중 필터조건

Filter 조건번호	종 류
1	소일시멘트 미량 도포 (암버력 사이 간격으로 필터재의 유실 방지)
2	일반토사(현장에서 쉽게 구할 수 있는 일반토사)
3	균일 입도의 모래
4	입도제시 필터조건 1
5	입도제시 필터조건 2 가장 양호한 합성필터 기준(모래 70%~자갈 30%)

입도제시 Filter 조건	입도제시 Filter 조건	
	입도제시 기준(%)	1(굵은필터재)
100	37.5mm	19.05mm
80~95	26.5mm	9.53mm(85%)
60~90	19mm	
30~65	4.75mm	1.6mm(50%)
20~50	2.36mm	
10~30	0.425mm	0.31mm(15%)
2~10	0.075mm	0.12mm



4.4.3 필터조건

표 6 참조

4.4.4 실험수행과정

표 7 참조

표 7. 도로 진동하중 실험수행과정

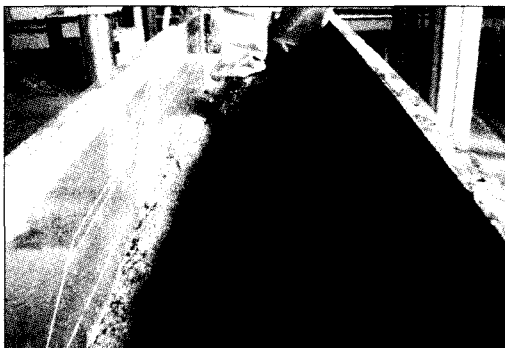
시공순서	세부작업
암버력 쌓기/다짐	<ul style="list-style-type: none"> • 상사비(1:10)에 맞춘 입도 조정 • 각층의 쌓기 및 다짐은 토공기준에 근접하게 실시
필터층 쌓기/다짐	
노상층 쌓기/다짐	
계측기 설치	<ul style="list-style-type: none"> • 진동하중 재하시 도로의 침하를 측정하기 위하여 노상층 상부에서 필터층 상부와 암버력층 상부까지 각각 천공하고 다이얼 게이지를 설치
진동대 거치/ 재하	<ul style="list-style-type: none"> • 모형 토조를 진동시험기에 설치하고, 진동하중을 포장면에 작용시킬 수 있는 장비 부착 • 3Hz, Sine(정현파)파의 진동하중 약 20 만회 작용
실험완료 후 측정	<ul style="list-style-type: none"> • 필터층과 암버력층의 변위 • 암버력층에 침입된 필터층 두께



암버력 쌓기



암버력 다짐



필터층 쌓기



필터층 다짐

그림 7. 시험과정 주요 전경

●시험과정 주요 전경

그림 7, 8, 9, 10, 11, 12 참조

◎ 노상층 쌓기 시 노면 고르기 및 최적함수비를 고려한 노상층 다짐

그림 8 참조

◎ 시공단면의 필터층과 암버력층의 변위를 측정하기 위해 계측기 설치를 위한 천공 실시

그림 9 참조

◎ 필터층과 암버력층의 변위를 측정하기 위해 LVDT(계측기) 설치

그림 10 참조

◎ 진동대 시험을 위해 대형 토조를 진동대에 거치 후 진동하중 재하

그림 11 참조

◎ 실험 완료 후 실험 하중에 의해 필터층이 암버력층 내부로 침입되어 공극을 메우게 되고 이로 인해 부피의 변화가 발생함

그림 12 참조



노상층 쌓기



노상층 다짐

그림 8. 노상층 쌓기 시 노면 고르기 및 최적함수비를 고려한 노상층 다짐

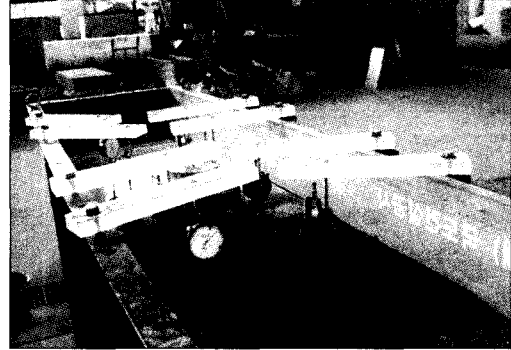
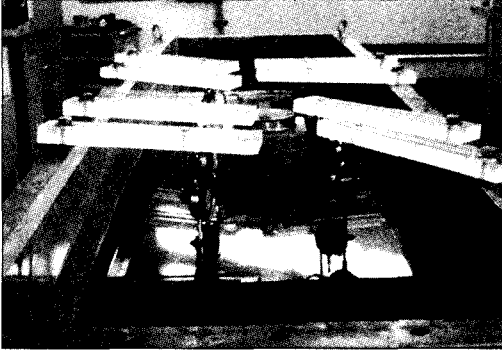


계측기 설치용 천공 실시



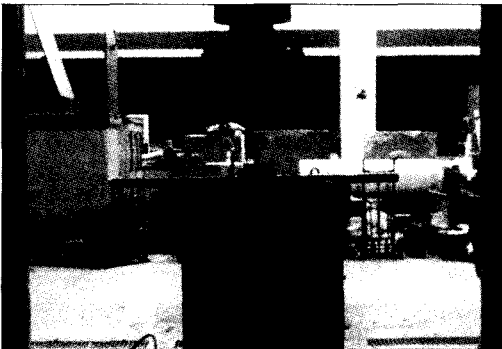
천공 완료 단면

그림 9. 시공단면의 필터층과 암버력층의 변위를 측정하기 위해 계측기 설치를 위한 천공 실시

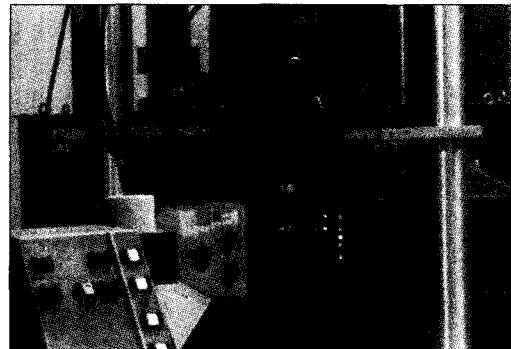


계측기 설치

그림 10. 필터층과 암버력층의 변위를 측정하기 위해 LVDT(계측기) 설치

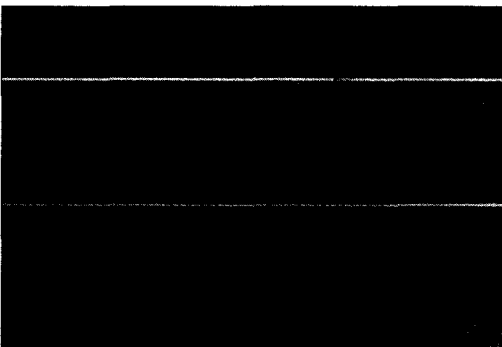


진동대 거치

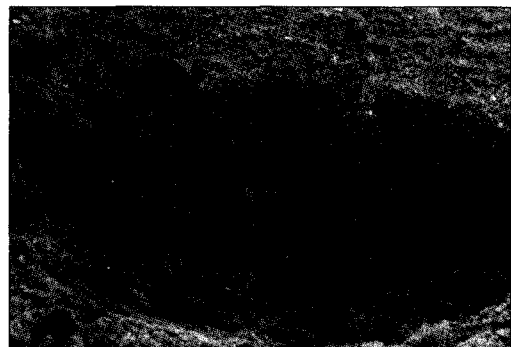


진동하중 재하

그림 11. 진동대 시험을 위해 대형 토조를 진동대에 거치 후 진동하중 재하



시험완료 후 필터층과 암버력층



암버력층에 침입된 필터층 두께

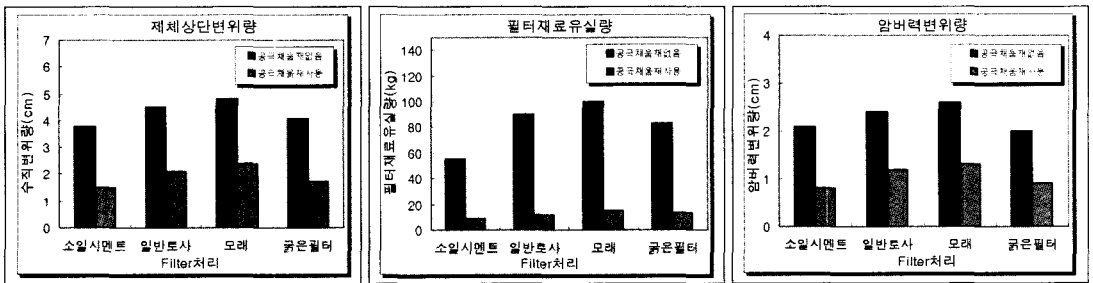
그림 12. 실험 완료 후 실험 하중에 의해 필터층이 암버력층 내부로 침입되어 공극을 메우게 되고 이로 인해 부피의 변화

표 8. 변형측정 결과

실험 조건		필터 상단 최대변위량 (cm)	필터층 두께변화량 (cm)	필터 재료유실량 (kg)	필터층 체적변화율 (%)	압버력 최대변위량 (cm)
Case 1 (공극채움재 사용) (압버력 300mm)	F-1(Soil-Cement)	1.5	0.8	9	1.4	0.8
	F-2(일반토사)	2.1	1.1	12	1.7	1.2
	F-3(모래)	2.4	1.5	15	1.7	1.3
	F-4(굵은필터재)	1.7	0.9	13	1.3	0.9
공극채움재 사용 평균치		1.9	1.1	12.2	4.6	1.05
Case 2 (공극채움재 없음) (압버력 300mm)	F-1(Soil-Cement)	3.8	3.0	55	2.2	2.1
	F-2(일반토사)	4.5	3.4	90	7.2	2.4
	F-3(모래)	4.8	3.7	101	8.2	2.6
	F-4(굵은필터재)	4.1	3.2	83	6.9	2.0
공극채움재 미사용 평균치		4.3	3.3	62	6.1	4.5
Case 3(공극채움재 사용, 세립필터) (압버력300mm)		1.6	0.8	10	1.2	0.9
Case 4(공극채움재 없음, 세립필터) (압버력300mm, 600mm 혼용)		3.6	2.8	60	2.5	2.0

※ 각 변화량 값은 상사비를 고려 실제 크기로 환산한 값임.

표 9. 변형측정 결과 비교 분석



필터층	<ul style="list-style-type: none"> • 필터층은 압버력층 내부에 공극채움재의 사용여부에 큰 변위차이를 보임 • 필터층 자체의 변위량은 전 토층변위량의 약 50%를 보임 • 필터층의 재료는 소일시멘트를 사용하는 경우가 변형 및 유실에 가장 안정적임 • 소일시멘트를 사용하지 않는 경우에는 큰 입경 범위 필터재의 경우가 안정적임
공극 채움재	<ul style="list-style-type: none"> • 공극채움재 미사용의 경우 다량의 필터층의 변형 및 유실 발생 • 압버력층의 변형 경향을 볼때 공극채움재 사용 유무가 변형에 주요한 요소로 작용함
압버력층	<ul style="list-style-type: none"> • 압버력층 자체의 변형은 공극채움재의 사용유무에 크게 의존함 • 공극채움재를 사용할 경우 300mm 압버력층과 600mm와 300mm를 혼용한 압버력층의 변형성에 큰 차이가 없음



4.5 변형측정 및 결과 정리

4.5.1 측정결과

표 8 참조

4.5.2 결과 비교 분석

표 9 참조

5. 결론

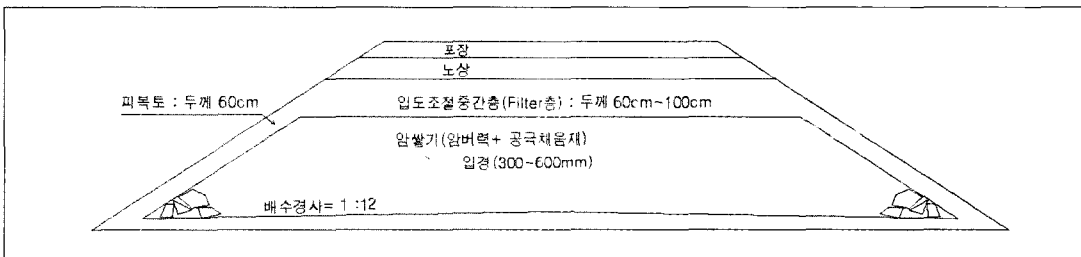
5.1 모형실험 종합분석

- 시공시 공극채움재의 사용여부가 쌓기 체체내 변형에 큰 영향을 미치므로 공극채움재의 사용은 필수적인 것으로 나타남.
- 소일시멘트를 사용하는 경우를 제외하고 필터재 입도분포의 변경은 체체의 변형에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타남.

- 필터층과 암버력층 사이에는 소일시멘트를 도포하여 유실을 막는 것이 체체의 장기적인 안정에 가장 좋은 방법으로 판단됨.
- 시공성 및 경제성을 고려하여 소일시멘트를 이용하지 않는 경우, 암버력 입경조절과 공극채움재 포설 및 다짐에 주의함으로써 이에 상응하는 안정적인 효과를 거둘수 있는 것으로 나타남.
- 공극채움재를 사용할 경우 암버력의 입경크기는 체체의 거동에 큰 영향을 미치지 않으므로 기존시방기준에서 제시하는 300~600mm의 암버력을 혼용하여 현장 시공성을 높일 수 있을 것으로 판단됨.
- 다짐방법 및 기준은 기존 시방의 방법을 유지하는 것이 품질관리에 용이할 것으로 판단됨.

5.2 암버력 쌓기 단면 제시

그림 13 참조



기존 표준단면 대비 개선 사항

- 암버력의 직경은 현장에서 생산되는 암버력중 최대 600mm 까지 사용할 수 있으며 큰 입경과 작은입경이 골고루 섞이는 것이 좋은 효과를 거둘 수 있음.
- 필터층의 두께는 암버력 노출부의 토사 도포처리와 연결되어 100cm정도가 적당할 것으로 제안함.
- 필터층의 입도분포 특성이 체체변형에 큰 영향을 주지 않을 것으로 나타나며 필터재료로서 현장 유용도의 사용에 대한 타당성은 입도분석 결과를 활용하여 판단할 수 있을 것으로 나타남.

그림 13. 암버력 쌓기 단면