

현장탄성파시험을 이용한 강화노반의 시간적 강성 변화 Temporal Variations of Reinforced Roadbed Stiffness Using In-situ Seismic Tests

목영진* 박철수** 임정열*** 최충락****
Mok, Young-Jin Park, Chul-Soo Lim, Jeong-Yeul Choi, Choong-Lak

ABSTRACT

Reinforced roadbeds are valued from the point of view of maintenance as well as enhanced mechanical capacity. They support more train load and less transmit to the sub-layers than general roadbeds. Also, the lateral sloping surface of the reinforced roadbed and its low permeability, achieved by the controlled compaction, increase drainage capability and prevent the softening of sub-layers. In the study, a series of cross-hole tests was performed to observe the temporal changes in the stiffness of reinforced roadbeds, if any, due to the cyclic loading of trains and alternating rainy and frozen seasons at Pyeong-taek experimental site. The three types of reinforced roadbed materials are slag, crushed stones, and soils, and the thickness of all the reinforced roadbeds is 0.8m. The stiffness of the slag and soil reinforced roadbeds was not changed or slightly decreased. The stiffness of the crushed stone was somewhat increased and is inferred to being densified close to surface.

1. 서 론

철도노반의 역학적 기능의 향상과 유지관리 측면에서 강화노반의 중요성이 대두되고 있다. 강화노반은 열차운행 시 노반에 전달되는 하중을 감소시킬 뿐만 아니라 노반으로의 지표수 유입을 막아 노반의 연약화를 방지하는 역할을 한다(Hwang 2004, 철기연 2006). 따라서 현재 국내의 철도노반 시공에 있어 강화노반의 시공이 본격화 되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 차량의 반복하중과 기후의 영향에 의한 강화노반의 장기적 내구성을 살펴보기 위하여, 평택에 위치한 강화노반 현장부설구간에서 2차에 걸쳐 크로스홀 시험(cross-hole tests)을 수행하였다. 1차 크로스홀 시험은 동절기가 끝난 2006년 3월에 실시하였고, 2차 크로스홀 시험은 우기가 끝난 2006년 9월에 실시하였다. 우리나라는 기후 특성상 우기와 동절기가 반복되어 노반 속으로 침투한 우수와 동절기에 형성된 얼음(ice lenses)이 녹아 노반의 연약화를 초래하는 분니(mud-pumping)가 발생한다(목영진 등 1999). 크로스홀 시험은 대표적인 현장탄성파 시험으로서 시공 후 열차운행 시일경과에 따라 도상자갈 아래에 놓인 강화노반의 강성을 평가하는데 있어 현실적으로 가장 적합한 시험기법이다. 평택의 현장부설 강화노반의 두께는 각 재료별로 0.3m, 0.5m, 0.8m로 조성되어 있었으며, 크로스홀 시험은 0.8m 두께의 고로슬래그, 입도 조정 쇄석, 일반 흙 강화노반에서 수행되었다. 크로스홀 시험으로 얻은 동적물성치 즉, 강화노반의 강성은 전단파속도(S-wave velocity), 압축파속도(P-wave velocity), 포아송비(poisson's ratio)이다. 두 차례에 걸친 크로스홀 시험의 결과와 함께 시공 직후(도상자갈 포설 전)에 측정한 기존의 SASW 결과(1998)를 비교하여 계절적 변화와 열차 운행에 따른 강성의 변화가 있는지 살펴보았다.

* 경희대학교 토목건축대학, 교수
E-mail : yjmok@khu.ac.kr
TEL : (031)201-2927 FAX : (031)202-8854

** 경희대학교 토목공학과, 박사과정

*** 한국수자원공사 수자원연구원, 선임연구원

**** (주)평화엔지니어링, 차장

2. 크로스홀 시험을 이용한 동적 강성 평가

2.1 크로스홀 시험

크로스홀 시험은 지반의 전단파속도와 압축파속도를 깊이별로 측정할 수 있는 현장시험법이다(Hoar and Stokoe, 1978). 그림 1과 같이 두 개 이상의 검측공을 설치하고 한쪽은 발진자(source)를 설치하고 나머지 검측공에는 감지기(receiver)를 같은 깊이에 설치한다. 이때 발진자에서 발생시킨 진동이 지반을 통과하여 감지기에 도달하는 시간을 측정하여 깊이별로 탄성과 속도를 측정할 수 있고, 또한 구속탄성계수(constrained modulus), 전단변형계수(shear modulus), 그리고 포아송비(poisson's ratio)를 구할 수 있다(Mok 1987). 파의 진행경로가 일정하고, 발진자와 감지기가 같은 위치에 있어 자세한 지층구조를 알아낼 수 있는 가장 정밀한 측정방법이다. 크로스홀 시험은 검측공(직경 75mm) 내에 설치할 정도로 소형이며 효율적인 타격에너지를 낼 수 있는 성능 좋은 발진자가 필요하고, 케이싱 설치와 주변 지반과 밀실한 접촉을 확보하기 위한 그라우팅을 추가 시행해야한다.

2.2 탄성과 발생을 위한 발진자의 개발

기존에 검측공에 삽입하여 탄성과 시험용으로 사용했던 발진자는 기계식 발진자(mechanical source)와 압전소자형 발진자(piezoelectric source)가 있다. 기계식 발진자는 공벽에 밀착시키는 췌기장치와 타격해머로 이루어져 있다. 이 발진자는 크로스홀 시험에서 전단파 계측에 매우 실용적으로 사용되고 있으나 개방형 구조로 구성되어 지하수위가 있는 곳에서는 물의 저항력으로 인해 사용할 수 없다. 그리고 많은 타격횟수를 견디기에 좋은 견고한 구조이나 무게가 다소 무거워 실험자가 오랫동안 수직된 시추공에 넣어 실험하기에 어려움이 있다. 압전소자(piezoelectric material)형 장비는 GeoPing이라 부르며 다운홀 유닛(downhole unit)과 제어 유닛으로 이루어져 있다(Paik et al. 1997). 이 장비의 핵심 원리는 압전소자에 전압을 가하면 전기적 에너지가 축적되며 압전소자가 변형되었다가 트리거(trigger) 신호에 의해 전기장이 방출되면서 충격에너지가 방출된다. 즉, 눌렸던 용수철이 통겨지듯이 탄성에너지가 방출된다. 이 장비의 특징은 기존 기계식 발진자(mechanical source)와는 달리 충격 에너지 조절이 가능하고(전압을 조절하여), 일정한 탄성과 에너지 발생에 있어 반복성과 조정능력이 탁월하며 지하수위가 있는 곳에서도 사용할 수 있도록 방수가 확실하다. 단점은 기계적, 전기적 장치가 정교하여 고가이고, 열악한 현장조건에 비해 견고성이 떨어진다. 또한 발생된 변형이 작아 암반에서 적합하나 토사지반에서는 적용성이 떨어진다.

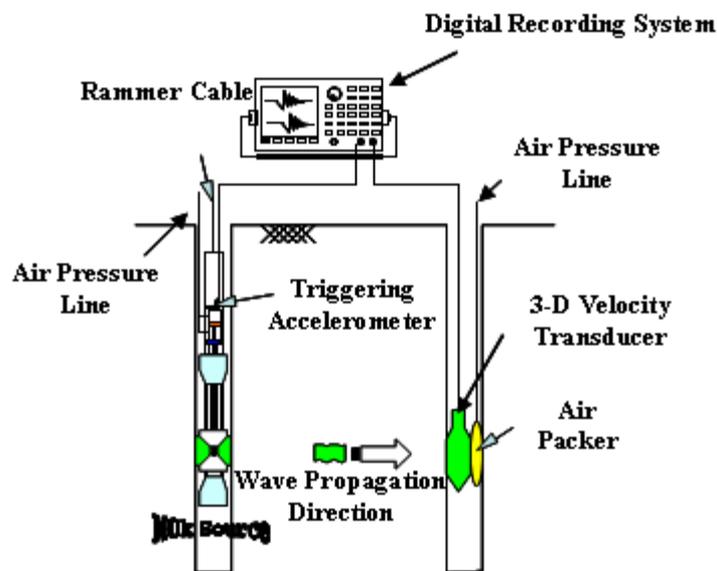


그림 1. 크로스홀 시험 개요도
405

새롭게 개발된 스프링-서보모터 발진자(spring-servomotor source)는 암반뿐만 아니라 느슨한 토사지반에서도 사용할 수 있는 충분한 탄성과 에너지를 발생한다. 발진자와 감지기의 공벽 밀착 장치는 기존에 적용된 압축 공기 주머니(air packer)나 판 스프링(plate spring)대신 기계식 밀착 장치(mechanical packer)를 사용하였다. 기계식 밀착 장치를 사용하여 지하수위 아래에서 수압으로 인한 공기 주머니의 팽창 한계와 지속적인 공기 공급이 이루어져야 하는 불편함을 없앴고, 공기를 공급하는 부대장비가 필요치 않아 크로스홀 시험 장비를 간편하게 하였다. 발진자의 탄성과 발진장치와 발진자 및 감지기의 공벽 밀착 장치는 작동이 간편하고 반복성이 우수해야 한다. 이와 같은 조건을 만족하기 위해 서보모터(servomotor)를 장착하고 간단하게 조작이 가능한 제어 장치(control unit)를 개발하였다. 개발된 크로스홀 시험 장비는 현장의 기술자가 쉽게 사용할 수 있으며, 발진자와 감지기를 진동차단(isolator) 기능의 연결재로 연결하면 인홀 탄성과 시험도 수행이 가능하다. 그림 2는 최종적으로 개량된 발진자의 개요도와 발진자와 감지기 그리고 제어 장치를 보여주고 있다.

2.3 탄성과속도 및 변형계수의 결정

매질을 따라서 전파되는 응력파(stress wave)에는 반구형의 형태로 지중으로 전파되는 체적파(body waves)와 실린더 모양의 지표면을 따라서 전파되는 표면파(surface waves)가 있다. 이들 응력파는 지반의 강성(stiffness)과 매질의 밀도(density)에 관계가 있다(Kramer, 1996). 매질 내부를 전파하는 체적파에는 압축파와 전단파 두 종류가 있다. 압축파는 전단변형이 없이 체적 변형만을 일으키며, 매질 입자의 운동 방향은 파가 전파하는 방향과 동일하다. 전단파의 경우에는 압축파와는 반대로 체적 변형은 일으키지 않고 전단 변형만 일으키며, 입자의 운동 방향은 파가 전파되는 방향과 직각을 이루며 전파해 나간다.

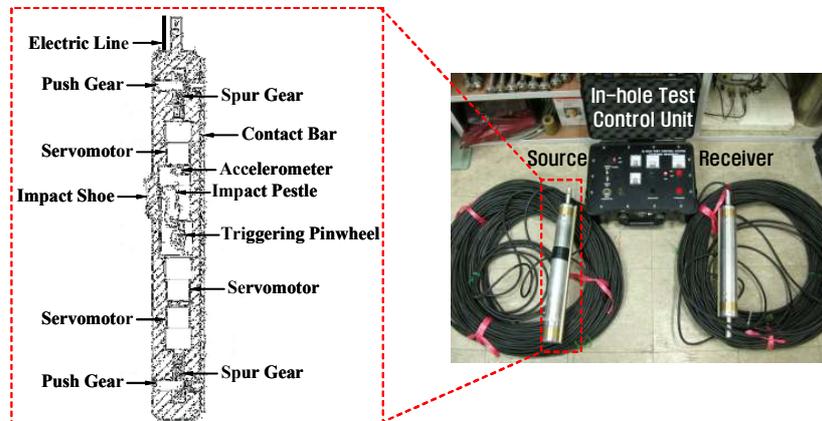


그림 2. 기계식 공벽 밀착 시스템의 스프링-서보모터 발진자와 감지기

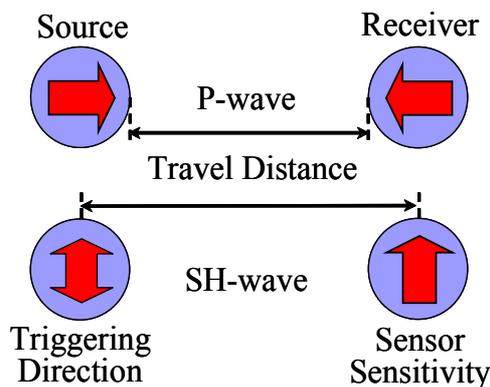


그림 3. 압축파 및 전단파 계측을 위한 계측기의 방향성

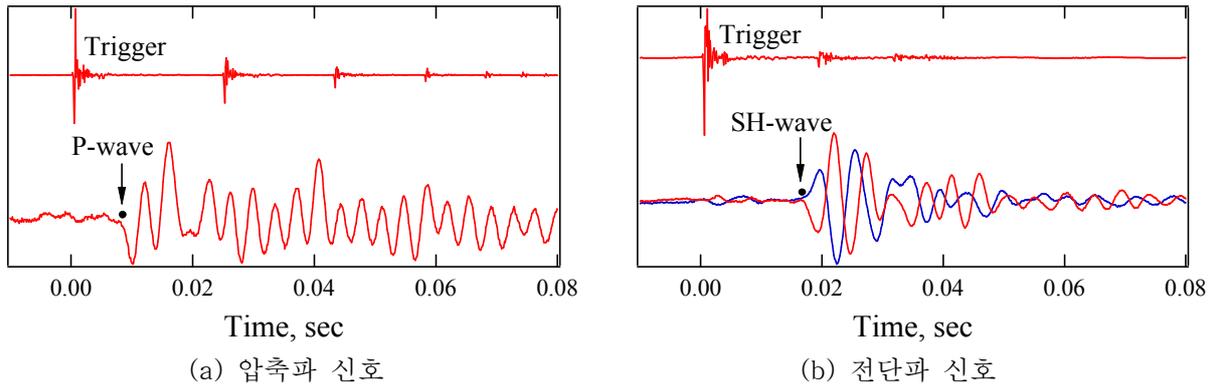


그림 4. 횡방향 발진 크로스홀 시험으로부터 획득한 전형적인 탄성과 신호

$$M = \rho V_p^2 \quad (1)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (2)$$

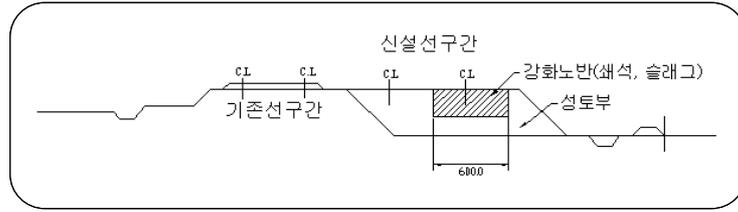
$$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2} \quad (3)$$

크로스홀 시험에서는 동일한 깊이에 놓인 발진자와 감지기의 수평거리를 현장에서 측정한 탄성파의 통과시간으로 나누어 파의 속도를 구할 수 있다. 그림 3과 같이 파의 전파 방향과 입자 운동 방향에 맞게 발진기 및 감지기의 방향을 조절하여 압축파 또는 전단파를 계측하게 된다. 그림 4는 크로스홀 시험으로부터 획득한 전형적인 압축파신호(a)와 전단파신호(b)이다. 특히 수평전단파(SH-wave)의 경우 횡방향 발진 탄성과 발진자의 방향을 180° 반전시키고 극성(polarity)을 이용하여 전단파의 도달시점을 결정하게 된다. 획득한 비구속 압축파속도(V_p)와 전단파속도(V_s)를 지반의 밀도(density, ρ)와 함께 식 1과 2에서 제시한 바와 같이 계산하면 구속탄성계수(constrained modulus, M), 전단변형계수(shear modulus, G)을 결정할 수 있다. 그리고 식 3과 같이 포아송비(poisson's ratio, ν)를 획득하게 된다. 변형계수의 결정은 지반의 밀도 보다는 탄성파속도에 더 민감하여 자승에 비례함을 알 수 있다. 즉, 신뢰성 있고 정확한 탄성파속도의 계측은 지반의 강성 결정에 매우 중요하다.

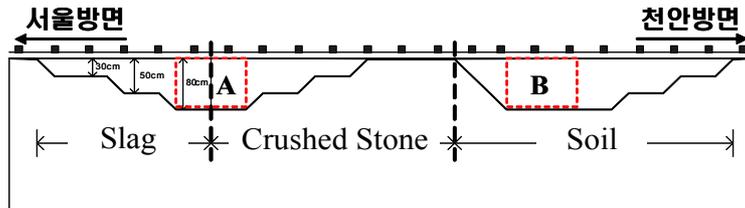
3. 계측결과 및 분석

3.1 현장부설 강화노반

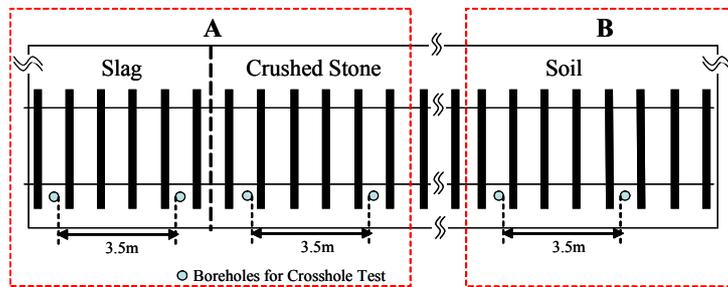
강화노반은 상부노반위에 흙보다 강성이 큰 재료를 사용하여 도상층 하부에서 전달되는 응력을 노반 상부에서의 허용 하중(응력) 이하로 감소시킴으로써 노반의 훼손을 방지하고, 빗물이 노반으로의 침투되는 것을 방지하여 분리의 발생을 억제한다. 국내에서도 일반철도 및 고속철도 신설 건설시 강화노반이 채택되어 시공되고 있다. 본 연구에서는 1999년 경부선 신설구간(그림 5(a))에 시공 완료된 평택의 강화노반 현장부설구간에서 계절적 변화 및 시일 경과에 따른 강화노반 재료별 강성을 계측하기 위해 두 차례(2006.3; 2006.9)에 걸쳐 크로스홀 시험을 수행하였다. 시험부지로 조성된 강화노반 현장은 경부선 수원-천안간 2복선 구간중 서울기점 상2선 70k400m~70k560m 구간으로 원지반은 논이며, 양질의 토사를 이용하여 성토고 3m, 폭 10m, 비탈구배 1:1.5로 되어있다(철기연 2000). 그림 5는 현장부설구간의 단면도와 시험위치를 보여주고 있다. 크로스홀 시험의 위치는 그림 5(b)에서 점선의 블록(A, B)으로 표시한 바와 같이 제일 두꺼운 두께 0.8m 지점을 선정하였다. 각 재료별 크로스홀 시험을 위한 검측공의 간격은 3.5m로 동일하였다(그림 5(c)).



(a) 횡단면도



(b) 종단면도



(c) 평면도

그림 5. 현장부설구간의 단면도

3.2 강화노반의 재료적 특성

현장부설구간의 강화노반은 조성 재료에 따라 고로슬래그, 입도 조정 쇄석, 양질의 일반 흙으로 구분된다. 고로슬래그의 경우 포항제철에서 생산된 부산물인 수경성입도조정고로슬래그(HMS-25)를 최대입경 25mm에 맞도록 재가공된 슬래그이다. 고로슬래그의 입도분포는 도로용 철강슬래그(KS F2535)의 상·하한치 기준을 만족하고 다짐시험(A다짐-KS F2312) 결과 최대건조밀도(γ_{dmax})는 $2.15t/m^3$, 최적함수비(OMC)는 9.55%였다. 입도 조정 쇄석(M-40)은 경기도 안성에 위치한 채석장에서 채취한 것으로 주 암질은 호상 편마암이었다. 입도 조정 쇄석의 품질은 KS에 규정된 골재의 품질규정을 만족하고 있으며 최대건조밀도(γ_{dmax})는 $2.452t/m^3$, 최적함수비(OMC)는 7.65%였다. 도표 1은 쇄석의 공학적 성질을 보여준다. 토사 시료는 화강풍화토로 다짐시험 결과 최대건조밀도(γ_{dmax})는 $1.98t/m^3$, 최적함수비(OMC)는 10.3%였다(철기연 2000, 철기연 2006).

도표 1. 쇄석의 공학적 성질

암석명	비 중			흡수율 (%)	공극률 (%)	단위 용적 중량 (kg/m^3)	실적율 (%)	일축 압축 강도 (kg/cm^2)	마모율 (%)	안정성 (%)
	절대 건조 비중	표면 건조 포화 비중	겉보기 비중							
호상 편마암	2.65	2.67	2.70	0.71	42.10	1,540	57.90	829	24.1	4.3

3.3 시간에 따른 강화노반의 강성 변화

현재 운행 중인 평택의 현장부설 강화노반에 대하여 강화노반의 재료에 따라 시간적 강성 변화를 살펴보기 위하여 두 차례에 걸쳐 크로스홀 시험을 수행하였다. 과거 1998년에 도상자갈을 포설하기 전, 강화노반까지 시공이 완료되었을 때 비파괴 시험인 SASW 기법을 적용하여 노반의 깊이별 속도 주상도를 획득하였다. 본 연구에서는 직접 계측한 두 차례의 크로스홀 시험 결과와 더불어 과거 SASW로부터 도출된 결과를 참고하여 강화노반의 시간에 따른 강성 변화를 비교하였다(철기연 1999, 철기연 2000). 1차 크로스홀 시험은 동절기가 끝난 2006년 3월에 수행하였고, 2차 크로스홀 시험은 우기가 끝난 2006년 9월에 수행하였다. 또한 설치한 검측공은 케이싱과 그라우팅을 하여 향후 장기간 계측이 가능하도록 하였다. 강화노반의 압축파속도 및 전단파속도는 검측공 내에서 0.2m 간격으로 내려가며 측정되었고 그림 6에서 대표적인 탄성과 신호를 보여주고 있다. 각 신호에 표시된 검은 점이 탄성파의 도달시점이다.

그림 7(a)는 크로스홀 시험으로부터 평가된 슬래그 강화노반의 전단파속도와 압축파속도이며, 1차 및 2차 크로스홀 시험의 탄성파속도가 거의 비슷하였다. 전단파속도는 대략 270m/sec이었으며, 압축파속도는 500m/sec로 거의 일정한 속도를 보였다. 포아송비 또한 시간에 따라 큰 변화 없이 대략 0.3 정도였다. 그림 7(b)는 쇄석 강화노반에서 평가된 탄성파속도이다. 2차 크로스홀 시험으로부터 계측된 전단파속도와 압축파속도 모두 1차 크로스홀 시험의 결과보다 비슷한 포아송비의 범위 내에서 증가하였다. 특히 노반 상부에 가까울수록 조밀해지는 경향을 보였다. 포아송비는 국부적으로 다소 차이는 있었으나 0.25에서 0.3범위를 크게 벗어나지는 않았다. 그림 7(c)는 흙 강화노반에 대한 탄성파속도이다. 깊이 0.4m 이하는 전단파속도 및 압축파속도가 모두 시간이 경과하였을 때(6개월) 약간 증가하였다. 그러나 흙 강화노반의 상부인 깊이 0.2m에서는 우기 후에 계측한 2차 크로스홀 시험의 결과가 다소 작게 평가되었다. 1차 및 2차의 포아송비는 큰 변화 없이 0.33정도였다. 그림 7은 두 차례 크로스홀 시험의 결과만을 도시한 것이며, 그 결과와 함께 SASW의 결과는 도표 2에 정리하였다. 도표 2의 전단변형계수 및 구속탄성계수는 3.2절에서 제시하였던 각 재료의 밀도를 고려하여 2.3절의 식 1과 2로부터 계산되었다.

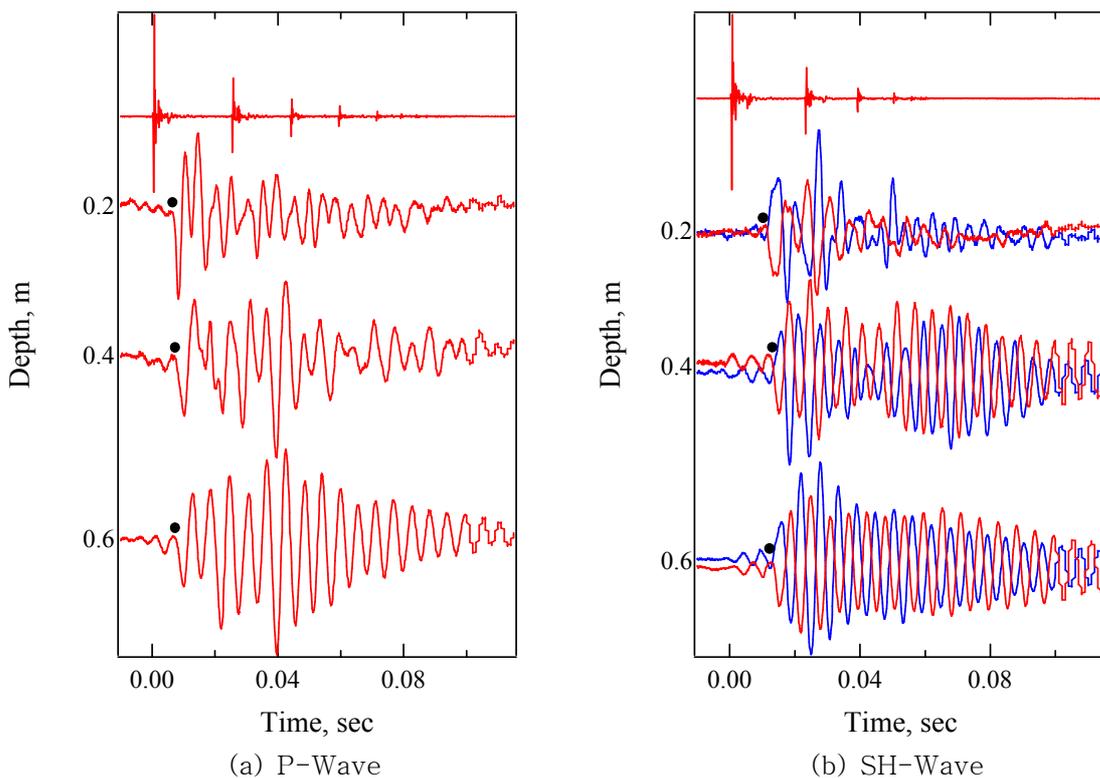


그림 6. 강화노반의 깊이에 따른 대표적인 탄성과 신호; 쇄석 2차 크로스홀 시험

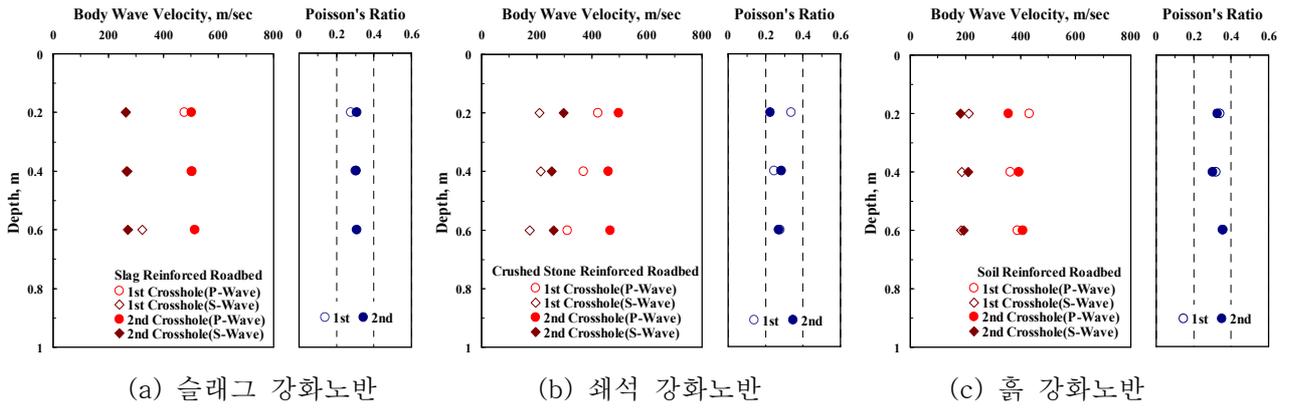


그림 7. 강화노반 재료별 탄성파속도 주상도 및 포아송비

표 2. 강화노반 재료 및 운행 연수에 따른 동적물성치

구 간	시험일시	시험방법	탄성파속도, m/sec	변형계수 ¹⁾ , MPa	평균 포아송비
슬래그강화노반	1998	SASW	V_s : 321 ~ 432	$G^{2)}$: 243 ~ 439	
	2006. 3	Cross-hole	V_s : 264 ~ 328 V_p : 477 ~ 505	G : 165 ~ 246 $M^{3)}$: 536 ~ 600	0.29
	2006. 9	Cross-hole	V_s : 264 ~ 270 V_p : 503 ~ 515	G : 164 ~ 172 M : 595 ~ 625	0.31
쇄석강화노반	1998	SASW	V_s : 167 ~ 237	G : 74 ~ 162	
	2006. 3	Cross-hole	V_s : 174 ~ 215 V_p : 312 ~ 423	G : 80 ~ 121 M : 258 ~ 471	0.29
	2006. 9	Cross-hole	V_s : 254 ~ 297 V_p : 461 ~ 499	G : 170 ~ 233 M : 562 ~ 657	0.26
흙강화노반	1998	SASW	V_s : 144 ~ 264	G : 45 ~ 152	
	2006. 3	Cross-hole	V_s : 183 ~ 212 V_p : 363 ~ 431	G : 73 ~ 98 M : 288 ~ 406	0.34
	2006. 9	Cross-hole	V_s : 182 ~ 209 V_p : 357 ~ 408	G : 72 ~ 96 M : 278 ~ 364	0.33

1) 크로스홀 시험으로부터 획득하는 변형계수는 변형률 크기 $10^{-5}\%$ 이하의 미소변형률 영역에 해당함.

2) Shear Modulus

3) Constrained Modulus

그림 8은 최초 강화노반 시공직후 SASW 기법을 이용하여 계측한 노반 재료별 전단파속도의 범위와 약 8년 뒤에 크로스홀 시험을 이용하여 두 차례 계측한 전단파속도의 범위를 한눈에 보여주고 있다. 참고로 그림 8의 결과는 측정 깊이를 고려하지 않고 단순히 속도의 범위만을 표현한 것이다. 슬래그 강화노반에서는 두 차례 크로스홀 시험의 결과가 다소 감소하거나 비슷하였다. 그러나 시공직후의 SASW 기법의 결과보다는 크게 감소한 값이었다. 흙 강화노반의 경우 세 차례의 전단파속도 계측 결과는 거의 비슷한 범위에 분포하였다. 이와는 달리 쇄석 강화노반에서는 2006년 9월에 계측한 2차 크로스홀 시험의 결과가 1차 결과보다 증가한 속도 범위를 보여준다. 열차 운행에 따른 반복하중의 작용으로 다짐의 효과를 보인 것으로 판단된다.

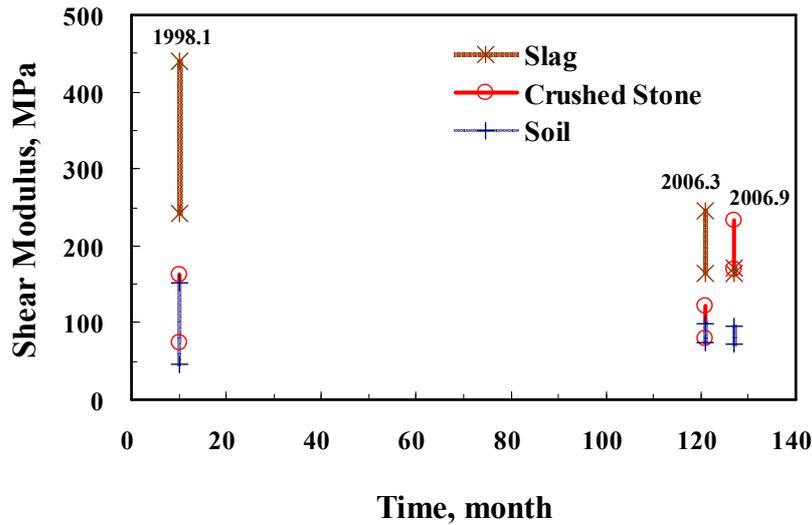


그림 8. 각 재료의 시간에 따른 강화노반의 전단변형계수 변화

4. 결 론

본 연구에서는 반복하중과 계절적 변화를 고려한 강화노반의 장기적인 내구성 변화를 살펴보기 위하여 평택에 위치한 강화노반 현장부설구간에서 2차에 걸쳐 크로스홀 시험을 수행하였다. 또한 횡방향 발진 탄성과 발진자를 조각이 간편하도록 개발하였다. 강화노반의 구성에 사용된 재료는 고로슬래그, 입도 조정 쇄석, 일반 흙이며 두께는 0.8m로 동일하였다. 슬래그 강화노반과 흙 강화노반의 강성은 거의 변화를 보이지 않거나 약간 감소하였다. 쇄석 강화노반의 강성은 다소 증가하였으며 지표면에 가까울수록 조밀해지는 경향을 보였다. 이는 열차 운행의 반복진동에 따른 입상 재료의 다짐효과가 반영된 것으로 보인다. 시험이 수행된 검측공에는 케이싱을 설치하여 현장을 보존하였고 향후 지속적인 계측이 가능하도록 하였다.

감사의 글

이 논문은 한국건설교통기술평가원이 주관하는 건설기술기반구축사업(05제안-08)의 위탁과제(C105B1000008-06B010000612)의 지원을 받아 수행된 연구 성과이며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 목영진, 황선근, 이성혁(1999), "분리가 발생한 철도노반토의 역학적 특성," 한국지반공학회 봄 학술발표 논문집, pp.415-422.
2. 한국철도기술연구원(1999), "철도노반재료로서 고로슬래그 활용화 방안 연구," 보고서.
3. 한국철도기술연구원(2000), "철도강화노반재료 및 지지력 강화방안에 관한 연구," 보고서.
4. 한국철도기술연구원(2006), "토공노반 최적두께산정을 위한 설계표준 기술연구(1차년도)," 보고서.
5. R-J. Hoar and K-H. Stokoe, II(1978), "Generation and Measurement of Shear Wave in situ," Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, ASTM, pp.3-29.
6. S-K. Hwang(2004), "Settlement Characteristics of the Railroad roadbed with Crushed Stones Under a Simulated Train Loading," Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.20, No.2, March, 2004, pp.5-13.
7. S-L. Kramer(1996), "Geotechnical Earthquake Engineering," Prentic-Hall, Inc., pp. 143-207.
8. Y-J. Mok(1987), "Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods," Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
9. Y-S. Paik, Y-J. Mok, and S-B. Im(1997), "A Study of the Geotechnical Imaging Techniques using Seismic Geotomography," Proceedings of the XIV ICSMFE, pp. 565-568.