

파일슬래브구조가 적용된 고속철도 토공노반에서의 진동 전파

Wave Propagation on a High-speed Railway Embankment Using a Pile-slab Structure

이일화* · 이성진 · 이수형 · 이강명

Il Wha Lee · Sung Jin Lee · Su Hyung Lee · Kang Myung Lee

Abstract The suppression of residual settlement is required on earthwork sections as concrete track is introduced. Use of pile-slab structure is one of the settlement restraining methods applied on soft ground. The slab distributes the upper embankment load and piles transfer the load from the slab to the stiff ground. While this method is very effective in terms of load transfer, it has not yet been established for dealing with the vibration transfer effects and interaction characteristics between a structure and the ground. It is possible that vibration caused by a moving train load is propagated in the upper embankment, because the slab acts as a reflection layer and waves are multi-reflected. In this present paper, wave propagation generated by a moving train load is evaluated in the time and frequency domains to consider a roadbed structure using an artificial impact load and field measured train load. The results confirmed the wave reflection effect on the pile-slab structure, if the embankment height is sufficient, vibration propagation can be stably restrained, whereas if the height is not sufficient, the vibration amplitude is increased.

Keywords : Pile-slab structure, Embankment, Wave propagation, Concrete track, Reflection

초 록 콘크리트케도가 도입됨에 따라 토공노반에서의 잔류침하 억제에 중요한 사안으로 대두되고 있다. 파일슬래브구조는 침하억제공법으로서 슬래브는 성토하중을 분산하고 파일은 분산된 하중을 지지층까지 직접 전달시켜 충분히 지지력을 확보하여 침하를 방지한다. 철도노반에 적용시 하중전달특성은 매우 우수하지만, 주행하중에 대한 진동전달 및 상호작용에 대한 특성이 규명되지 않았다. 구조적 특성상 이동하는 열차하중에 의해 발생한 진동은 슬래브를 반사층으로 하여 상부성토체 내에서 다중반사되어 전파할 가능성이 있는데 이는 열차의 주행안정성과 승차감에 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 파일슬래브가 설치된 철도노반에서 열차 주행에 의해 발생하는 진동에너지의 전파특성을 평가하기 위하여 인공적인 충격하중과 고속열차의 실측하중을 사용하여 노반구조별 진동전파특성을 시간영역 및 주파수 영역에서 해석하였다. 검토 결과, 파일슬래브 구조에서의 진동 반사효과를 확인하였으며, 적정 성토고가 확보되는 경우에는 진동에 안정적이지만 성토고가 낮은 경우에는 저주파 영역의 진동에너지가 증가하는 것으로 나타났다.

주요어 : 파일슬래브구조, 흩쌓기, 진동전파, 콘크리트케도, 반사

1. 서 론

철도 건설에 콘크리트케도가 도입됨에 따라 토공노반에서의 잔류침하량 억제가 중요한 사안으로 대두되었다. 연약지반 상에서 케도를 건설할 경우, 기존의 연약지반대책공법을 사용하여 콘크리트케도의 허용잔류침하량을 만족시키는 것이 매우 어렵고 공기 또한 많이 소요되기 때문에 대안으로 교량공, 치환공법, 성토지지말뚝공법, 파일슬래브공법 등을 적용하고 있다. 대안공법중 성토지지말뚝공법과 파일슬래브공법은 과거에 과도한 시공비와 안정성 문제 때문에 적용이 제한적이었으나, 최근에는 경제성이 확보되고 공기단축 및

잔류침하 억제 효과가 뛰어나 적용이 증가되고 있는 추세이다. 그러나 아직까지 명확한 이론적 정리가 되어 있지 않아 경험적으로 설계하고 있고, 적용시에는 현장조건, 시공조건, 지반조건, 케도와 상호작용조건 등을 복합적으로 고려하여야 한다. 특히 시공완료 후 보수나 보강이 매우 어렵기 때문에 설계 및 시공시에 세심한 주의가 요구된다[1,2,3].

파일슬래브공법은 원지반 침하 및 측방유동 방지 목적으로 적용되는 공법의 하나이다. 파일슬래브구조는 철도노반에 적용시 하중전달특성은 매우 우수하지만, 열차주행하중에 의한 진동전달 및 상호작용에 대한 특성이 규명되지 않았기 때문에 이에 대한 상세한 검토가 요구된다. 기본적으로 열차에 의해 발생한 진동도 하중과 마찬가지로 파일(말뚝)을 통하여 지지기반으로 전달되지만, 구조적 특성상 슬래브를 반사층으로 하여 상부성토체 내에서 다중반사되어 전파할 가능성이 크다. 성토체 내에서 다중반사되어 전파될 경

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-460-5326, E-mail : iwlee@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.4.278>

우에는 열차의 운행에 영향을 미칠 가능성이 있으며 발생 진동의 크기 또한 증폭될 가능성도 있다. 본 논문에서는 파일 슬래브가 설치된 철도노반에서 열차 주행에 의해 발생하는 진동에너지의 전파특성을 검토하기 위하여 인공적인 충격하중과 고속열차의 실측하중을 이용, 노반구조별 성토체 내부 및 외부로 전파하는 파의 특성을 검토하고자 하였다.

2. 토공노반의 연약지반 대책

연약지반상 구조물의 침하 및 활동에 의한 피해를 방지하기 위해서는 구조물을 축조하기 전에 연약지반을 개량하거나 보강함으로써 지반의 강성을 증대시키고 활동과파괴에 대한 저항력을 증대시켜야 한다. 연약지반에서의 개량방안은 크게 압밀축진공법과 침하억제공법으로 구분 할 수 있다.

압밀축진공법은 배수를 통하여 압밀을 촉진시키는 공법으로서 대표적으로 드레인공법, 샌드컴팩션공법 등이 있으며, 충분한 공사기간이 확보되고, 흙쌓기에 대한 시공관리를 철저히 할 경우에는 이상적인 연약지반 개량공법이 될 수 있다. 이 공법들은 국내 건설현장에서 주로 적용하는 연약지반 보강 공법으로 자갈레도 구간에서도 많이 적용하고 있다. 그러나 콘크리트레도와 같이 허용잔류침하량(노반설계시 25mm)[4]이 매우 작은 경우에는 적용이 불가능하다. 그 이유는 침하량 예측이 어렵고 2차 압밀이나 크리프(Creep)에 의한 추가 침하량이 크기 때문이다. 콘크리트레도와 같이 허용잔류침하량이작은 경우에는 2차 압밀이나 크리프에 의한 침하량만으로도 설계기준을 초과하는 경우가 많다.

침하억제공법으로는 토목섬유보강 성토지지말뚝공법과 파일슬래브공법 등이 있으며 성토체를 기초공을 통해 지지하여 침하를 억제하는 방식이다. 파일슬래브공법은 연약지반 내에 파일을 설치하고, 파일 두부 전면을 철근콘크리트 슬래브로 연결하여 시공한다. 슬래브는 상부의 성토하중을 분산하고, 분산된 하중을 파일을 통해 지지층인 암반층까지 직접 전달시켜 충분히 지지력을 확보하고 침하를 방지하여 구조물의 안정성을 도모한다[5,6]. 추가적으로 연약지반의 측방유동에 파일이 저항함으로써 기초지반의 강성을 증대시키는 효과도 있으며, 구조물과 성토지반 사이의 부등침하를 방지하는 목적으로도 사용한다. 아래의 Fig. 1은 호남고속철도에 적용된 파일슬래브의 단면도를 나타낸 그림이다. 성토고는 약 4m 수준이며 PHC파일을 적용하였다. 그림에서 우측에는 옹벽을 설치하여 공간을 확보하도록 하였다. 슬래브의

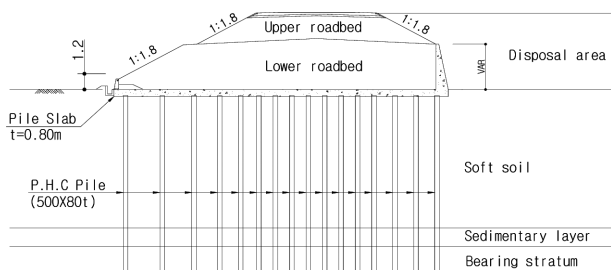


Fig. 1 Pile-slab structure applied to honam high-speed line

두께는 80cm로서 슬래브의 편칭과파괴에 대한 안전율이 과다하게 고려되어 두껍다.

방진측면에서 파일슬래브공법은 외부로부터 유입되는 진동을 차단하기 위하여 적용한 사례는 있으나 파일슬래브구조 내부에서 발생한 진동이 외부로 전파해 나가는 메카니즘에 대해서는 연구된 바가 없다.

3. 반사파의 영향

지반은 층상구조를 가지는데 일반적으로 깊이가 깊어질수록 강성이 점진적으로 증가한다. 이러한 구조에서 진동에너지는 큰 저항 없이 주변지반으로 전파해 간다. 그러나 층상 구조내에 강성이 낮은 층이 존재하거나 파일슬래브구조와 같이 강성이 매우 큰 슬래브가 반사층으로 작용할 경우에는 채널파(channel wave)가 발생하기도 한다. 채널파는 지층에서 다중 반사되어 전파되는 파동으로 저속도층 또는 구조적으로 파의 소산이 어려운 구조에서 상부층과 하부층 사이에서 제한적으로 전파하며, guide-wave라고도 불린다[6]. Fig. 2는 저속도층내 S파에 의해 생성되는 채널파를 보여준다. 층 내에서 발생한 S파는 지반의 강성(β) 및 입사각에 따라 반사(reflection)되거나 굴절(refraction)되어 전파한다. 입사파가 일정한 각도 이하이고 경계와 만나 반사된 파는 새로운 형태의 파군(wave group)을 이루게 되는데 파군의 형성 원인은 아주 작은 위상차를 갖는 파동의 간섭 때문에 발생한다. 채널파의 속도는 이 파군의 속도 즉, 군속도(group velocity)에 의해서 측정된다. 파일슬래브의 구조적 특성상 슬래브의 상부에서 발생한 진동에너지가 충분히 소산 또는 감쇠되지 않는다면 성토층 내부를 통하여 선로방향으로 다중 전파할 가능성이 있다. 이러한 다중반사는 상부노반의 두께가 얇은 경우에는 노반두께에 의존적인 탁월진동수를 발생시키기 때문에 열차하중에 의한 공진의 발생가능성도 배제할 수 없다.

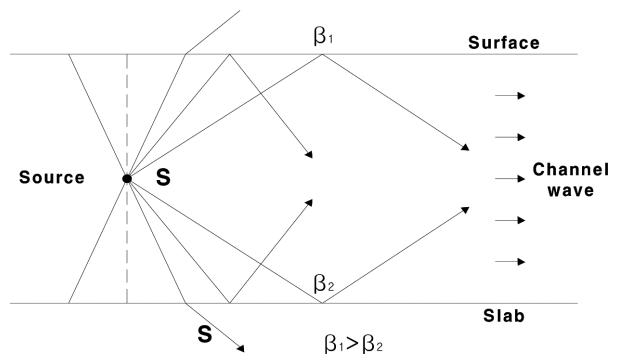


Fig. 2 Shear wave propagation in the channel layer [4]

4. 해석조건

파일슬래브구조에서의 파 전파특성을 검토하기 위하여 FEA프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 직접적분법을 활용한 평면변형을 조건하에서의 유한요소해석을 수행하였다. 해

석모델은 호남고속철도 표준단면을 사용하여 Fig. 3과 같이 연약지반층내에 파일을 생성하고, 파일 상부에 슬래브가 위치한다. 그 위로 성토층을 생성하고, HSB(Hydraulic Stabilized Base)층, TCL(Track Concrete Layer)층, 체결장치, 레일을 구성하였다. 요소의 크기는 10×10cm, 총 해석시간은 0.75초, 적분시간간격은 5.0×10⁻⁴초 이다. 해석의 정확성을 향상시키기 위해 열차의 주행속도를 300km/h로 일정하게 고정하고, 레일에 수직하중을 작용시켰으며, 해석단면의 양쪽측면과 하부경계는 응력파의 반사 및 굴절을 제거하기 위하여 무한요소를 적용하였다. 하부지층은 암반층으로 모델링하였다. 해석에 사용된 물성치는 Table 1과 같다. 레일패드 스프링 계수값은 Kim et al.(2005)이 횡변위와 회전각의 허용값을 고려하여 제시한 20×10³kN/m를 사용하였으며[7] 레일패드의 댐핑값은 Yang et al.(2009)이 적용한 100kN·sec/m를 적용하였다[8]. 지반재료에 대한 감쇠비는 질량이나 강성과 달리 명확하게 구성하기 어렵기 때문에 이러한 문제를 해결하는 방법으로 경험적인 레일리감쇠값을 사용하였다. 본 논문에서는 파일을 통하여 전파되는 환경진동은 고려하지 않았기 때문에 파일과 지반의 인터페이스모델은 고려하지 않았다. 해석에 적용된 케도노반의 상세한 해석조건 및 물성값은 아래

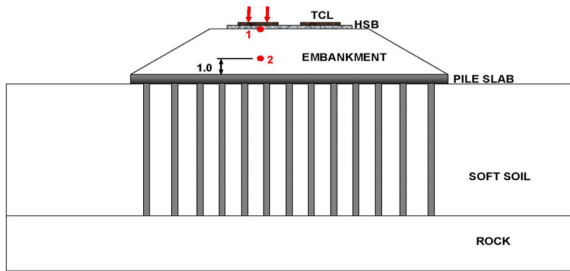


Fig. 3 Analysis model (Unit: m)

Table 1 Analysis parameters

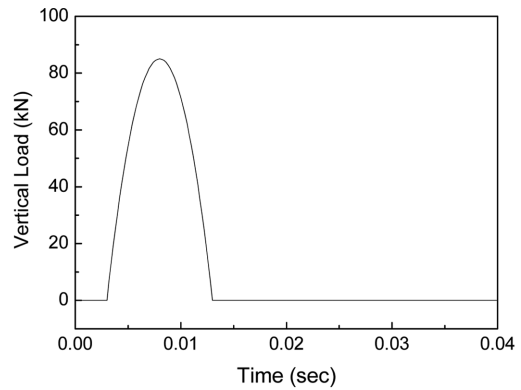
	Elastic modulus (MPa)	Density (kg/m ³)	Poisson ratio	Height (m)
Rail	21,000	1,700	0.333	0.2
TCL	24,500	2,450	0.21	0.3
HSB	23,500	2,350	0.21	0.3
Embankment	60	1,900	0.33	2,4,6,8
Pile	35,000	2,740	0.21	12.0
Slab	23,025	2,450	0.21	0.8
Soft soil	20	1,900	0.33	5,10,15,20
Rock	1,000	2,100	0.21	5
Pad spring coefficient	20,000kN/m			
Pad damping coefficient	100kN/(m/sec)			
Soil damping coefficient	$\alpha=0.1, \beta=0.0005$ (Rayleigh damping)			

의 Table 1에 정리하였다.

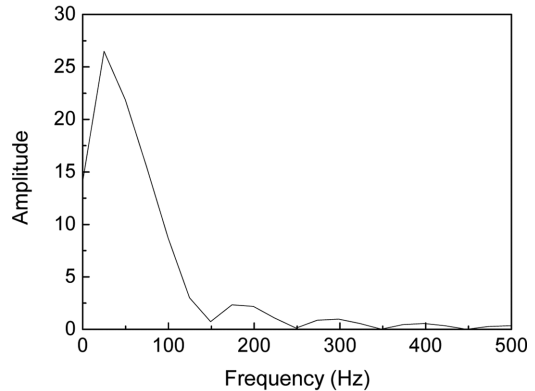
철도 하중은 일정 간격을 갖는 차륜에 의해 다수의 집중하중 형태로 재하된다. 따라서 재하조건에 의해 진동특성이 결정되기 때문에 파 전파특성에서는 입력하중의 결정이 중요하다. 본 논문에서는 하중입력조건을 일시적인 충격하중과 열차의 실측하중 두 가지로 나누어 해석을 수행하였다. 충격하중은 해석모델의 재하지점에 열차가 통과할 시점의 순간적인 충격하중을 집중하중으로 적용하였는데, 하중특성에 의한 주파수특성을 배제한 상태에서 구조물의 동적응답특성을 파악하기 위함이다. 열차 실측하중은 실제 현장에서 발생하는 열차진동특성을 검토하기 위하여 적용하였다. 300km/h로 운행하는 KTX열차의 차륜을 통해 레일로 전달되는 운중을 현장에서 직접 측정하여 입력하중으로 사용하였다.

5. 충격하중을 이용한 파 전파해석

본 절에서는 충격하중을 이용하여 파 전파특성을 검토하였다. 이때 사용한 충격하중은 열차의 축배치, 주행속도 등에 따른 주파수특성이 배제된 하중으로서 파일슬래브구조 고유의 파 전파 특성을 파악하기 위하여 적용하였다. Fig. 4는 본 해석에 사용된 충격하중 파형으로, half-sine파의 형태를 가지며 85kN의 집중하중으로 재하시켰다. 충격하중의 주파수특성은 Fig. 4의 (b)와 같이 총 500Hz까지의 주파수성분



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 4 Characteristics of impact load

을 가지며 대부분의 에너지는 100Hz 미만 영역에 집중된다. 일반적인 토공구조물의 지반진동 또는 파 전파 에너지의 주 파수성분은 50Hz미만이기 때문에 본 입력하중을 사용하더라도 노반구조물의 주파수특성을 충분히 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

5.1 파일슬래브구조에서의 파 전파

파일슬래브구조의 진동 전달특성을 검토하기 위하여 Fig. 5와 같이 성토고 4m의 일반성토구조와 파일슬래브구조를 대상으로 좌측선로에 충격하중을 재하하였을 때 동일시간대에서의 수직진동가속도 전파특성을 비교하였다. Fig. 5(a)는 일반성토구조로서 충격하중에 의해 발생한 수직진동가속도 에너지가 반원형상을 가지며 하부지반으로 점진적으로 전파되는 것으로 볼 수 있다. Fig. 5(b)는 파일슬래브구조로서 충격하중이 성토층을 전파하여 슬래브층을 기준으로 일부는 상부로 반사되고 일부는 파일을 통하여 하부지지지반으로 전파되는 것을 볼 수 있다.

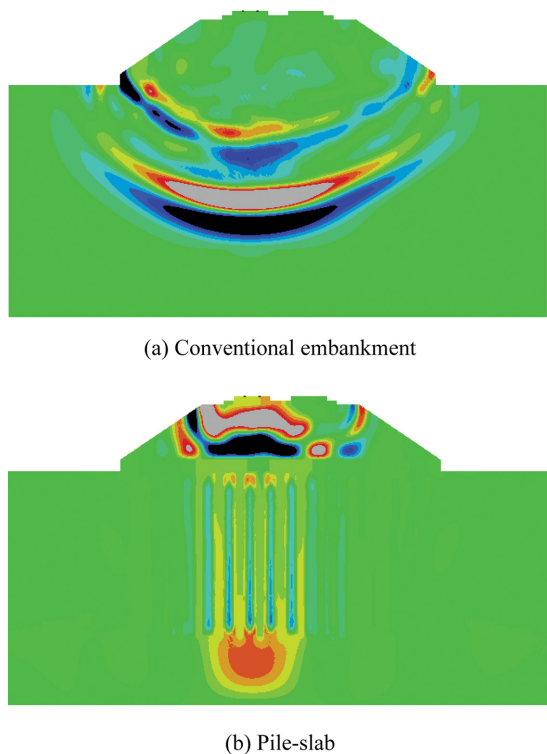


Fig. 5 Vertical acceleration contour for each structure

다음 Fig. 6은 Fig. 5의 조건별로 하중이 재하되는 궤도중심에서 깊이별 최대수직진동가속도의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)는 성토층을 포함하여 지지지반까지의 구간에서 깊이별 최대수직진동가속도를 나타낸 그림이고 Fig. 6(b)는 성토층 구간만 확대하여 표시한 그림이다. Fig. 6(a)에서 일반성토구조(○)에서의 진동특성은 전체적으로 상부면으로부터 심도가 깊어질수록 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 성토층과 원지반의 경계 깊이인 4m까지는 전체 진

동에너지의 약 60%가 감쇠되며 원지반층내에서도 지수함수적으로 감소하는 것으로 나타났다. 파일슬래브구조(□)에서는 성토층과 원지반층의 사이에 하중을 지지하는 슬래브층에서의 반사파의 영향으로 인하여 파 전파 특성이 다소 복잡하게 발생하는데 심도 2.5-3.7m구간에서는 최대 2배 이상 증가하며 4m이하에서는 0.025g이하로 일정한 경향을 나타낸다. 파일슬래브구조의 성토층 내부에서의 진동에너지 증가는 슬래브층에서의 반사효과 때문이다.

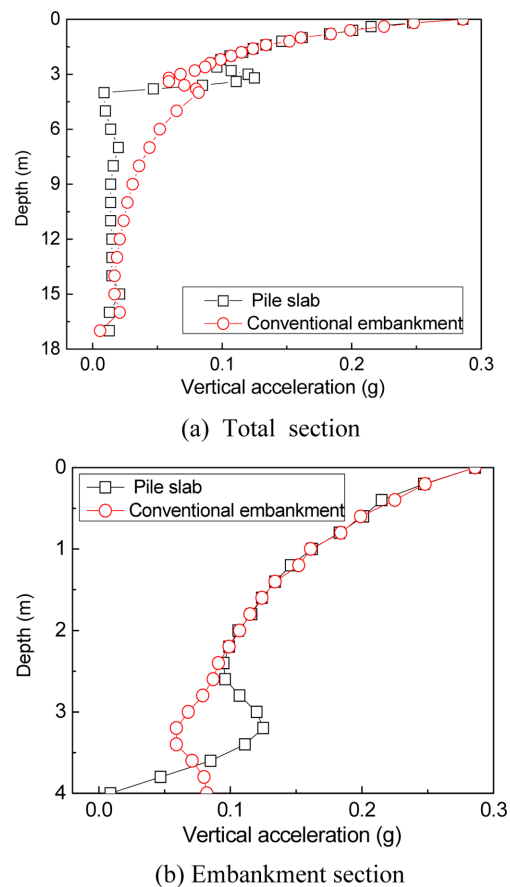


Fig. 6 The maximum vertical acceleration for each location (embankment : 4m)

5.2 반사파의 영향

파일슬래브구조는 성토층 전체를 콘크리트 슬래브가 지지하기 때문에 상부 성토층은 하부 원지반층과 분리되어 있으며, 상부에서 발생하는 하중은 대부분 파일을 통해서만 지지지반으로 전달되는 조건이다. 진동의 경우에도 유사한 전달경로를 가지지만 추가적으로는 슬래브층에서의 반사나 굴절로 인하여 진동에너지의 전달을 차단 또는 저감시킬 가능성이 있다. 따라서 불완전한 진동에너지 전달로 인하여 성토층 내부에서의 진동에너지 증가를 예상할 수 있다.

다음 Fig. 7, 8은 일반성토구조와 파일슬래브구조의 진동가속도의 시간이력과 주파수이력을 나타낸 그림이다. 단면 조건은 성토고가 4m이고 측정위치는 성토층 내부(Fig. 3의

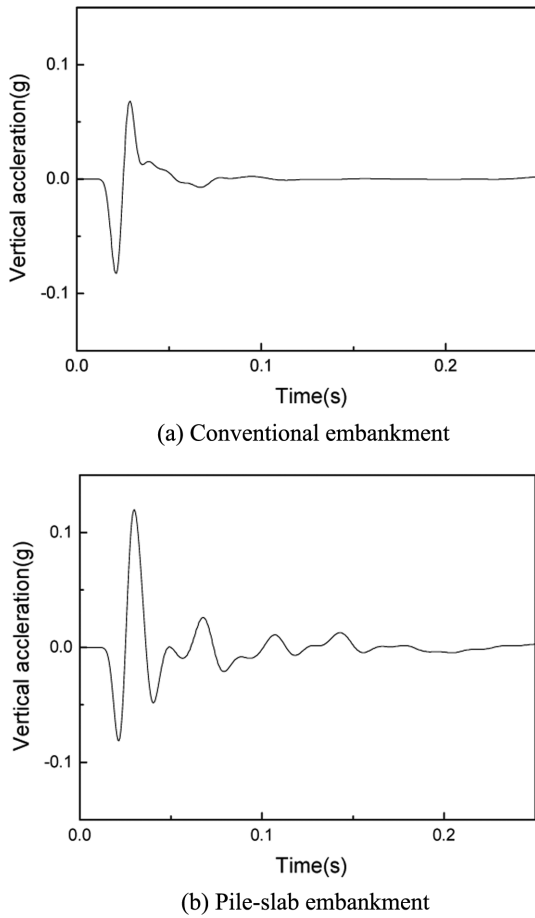


Fig. 7 Time history for impact load

위치2)이다. Fig. 7(a)의 일반성토구조에서는 충격하중이 작용하면 진동가속도는 입사된 입력파형을 그대로 나타내면서 전파하지만 Fig. 7(b)의 파일슬래브구조에서는 입사파의 입력파형에 연속하여 추가적인 진동에너지가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이는 콘크리트슬래브에 의해 발생한 반사파의 영향이며 다중반사하면서 전파하는 것을 확인할 수 있다. 입사파의 진동에너지도 증가하며 전파시간도 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 각 측정결과의 주파수분석 결과로서, 일반성토구조에서는 특별한 탁월대역을 확인할 수 없으나, 파일슬래브구조에서는 8.8Hz에서 탁월주파수가 증폭되는 현상을 확인할 수 있다. 8.8Hz는 성토고 및 지반강성에 의해 발생하는 다중반사파의 탁월주파수이다[7]. 발생 특정주파수가 열차하중조건에 의한 탁월주파수대역과 겹쳐질 경우에는 공진의 가능성도 있다. 8.8Hz는 KTX차량이 200km/h로 주행할 경우 동력대차간격에 의해 발생하는 탁월주파수이다.

Fig. 9는 파일슬래브의 성토층 상부면(Fig. 3에서 위치1)에서 성토고별 반사파의 영향을 비교한 그림이다. 그림에서 반사파의 비교는 진동에너지 리바운드비(입사파(W_I)와 1차 반사파(W_R) 최대값의 비)로 정량화하여 비교하였다. 성토고가 2m인 경우에는 반사파의 리바운드비는 0.24로서 입사파

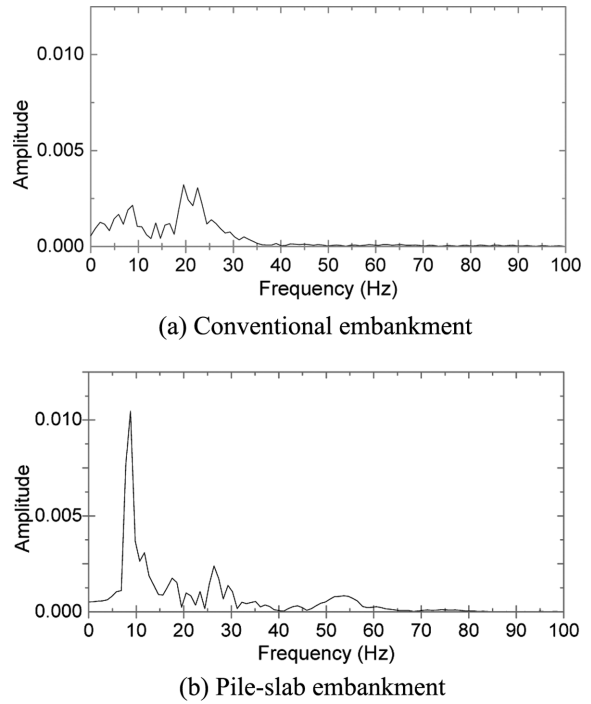


Fig. 8 Frequency response for impact load

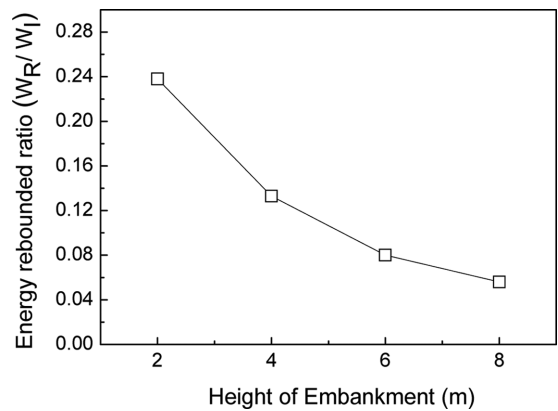


Fig. 9 Energy rebound ratio at top of embankment (W_R/W_I)

에너지의 약 25%에 달하는 반사에너지가 발생한 것으로 나타났다. 이러한 반사에너지는 KTX와 같이 입력하중이 긴 경우에는 궤도의 공용성에 문제를 유발할 수 있다[9]. 하지만 성토고가 4m이상으로 높아지는 경우에는 0.13이하로서 거리 및 재료감쇠로 인하여 리바운드비는 감소하는 것으로 나타났다.

5.3 성토층의 높이별 진동특성

충격하중이 가해졌을 때 성토층의 높이(2, 4, 6, 8m)별 파일슬래브구조의 진동특성을 검토하였다. 진동가속도의 특성을 평가하기 위하여 각 위치에서의 진동가속도의 크기와 주파수 특성을 검토하였다. Fig. 10은 성토층 상부면 및 성토층 내부에서의 최대수직진동가속도값을 성토고별로 비교한

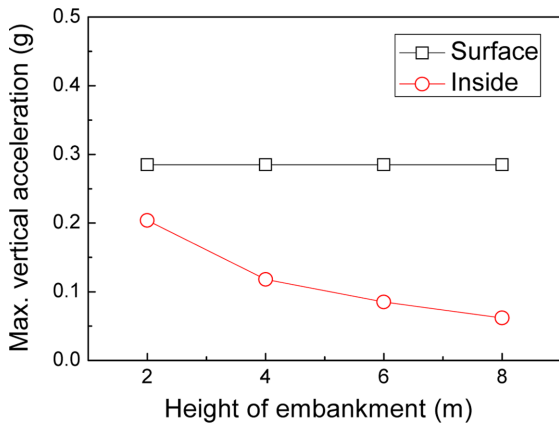


Fig. 10 Max. acceleration depending on embankment height using impact load

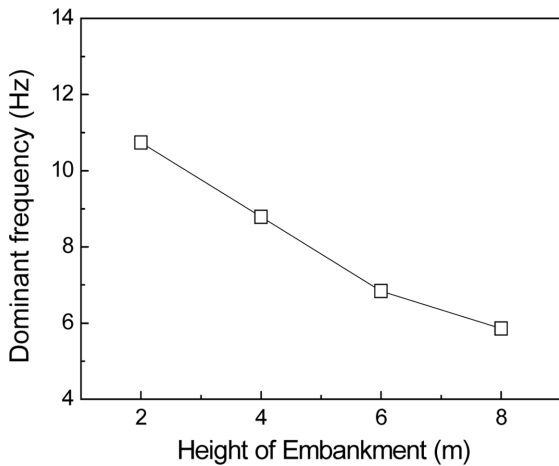


Fig. 11 Dominant frequency depending on embankment height using impact load

그림이다. 동일하중조건에서 성토층의 표면에 발생하는 최대수직진동가속도값은 0.28g로 동일한 값을 나타내었으며, 성토층 내부의 경우에는 성토고가 2m인 경우, 0.2g이고 8m인 경우 0.06g로 성토고가 증가할수록 진동가속도는 감소하는 것으로 나타났다. 충격하중으로 발생한 지반진동이 일부는 파일을 통하여 전달되고 일부는 슬래브를 반사층으로 성토층 내부에서 다중 반사하면서 전파된다고 가정할 때 성토층이 높아질수록 거리 및 재료감쇠로 인하여 진동의 크기가 감소한 것으로 판단된다. 즉 성토고가 8m에서 2m로 낮아지면 진동에너지는 약 3배 이상 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 11은 성토층의 높이별 성토층표면에서의 진동가속도의 탁월주파수를 비교한 그림으로서 성토층의 표면과 내부에서의 탁월주파수는 동일하다. 가속도의 탁월주파수는 성토고가 높아질수록 작아지는 경향을 나타내는데, 전달함수를 이용한 반무한 2층 노반의 동적응답해석결과와 유사한 결과를 나타내었다[9]. 따라서 Fig. 11의 탁월주파수는 성토층의 높이 및 강성에 의해 결정되는 응답특성이라고 할 수 있다.

5.4 연약지반의 심도별 진동특성

연약지반의 심도(5, 10, 15, 20m)별 파일슬래브구조의 진동특성을 검토하였다. 심도가 증가하면 파일의 길이 및 암반층의 깊이도 비례하여 증가한다. 성토층의 상부면(Fig. 3에서 1번위치)과 성토층내부(Fig. 3에서 2번위치)에서의 진동가속도의 크기와 주파수특성을 검토하였다. Fig. 12은 연약원지반 심도별 성토층 상부면 및 성토층 중심에서의 진동가속도의 값을 나타내었다. 연약지반의 심도별 진동가속도의 변화는 없는 것으로 나타났는데 하중으로 발생한 진동에너지는 성토층과 파일슬래브구조를 통하여 하부지반으로 전달됨으로서 원지반 조건에 의한 영향은 없는 것으로 판단된다. Fig. 13은 성토층표면에서 발생한 진동가속도의 탁월주파수를 나타낸 그림으로서 연약층의 심도에 따라서도 주파수의 변화가 미소하게 발생하는 것으로 나타났으며, 그 범위는 8.7-10.7Hz이다.

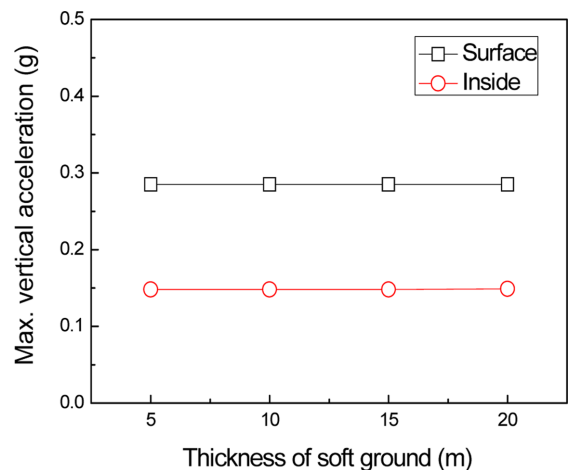


Fig. 12 Max. acceleration depending on thickness of soft ground using impact load

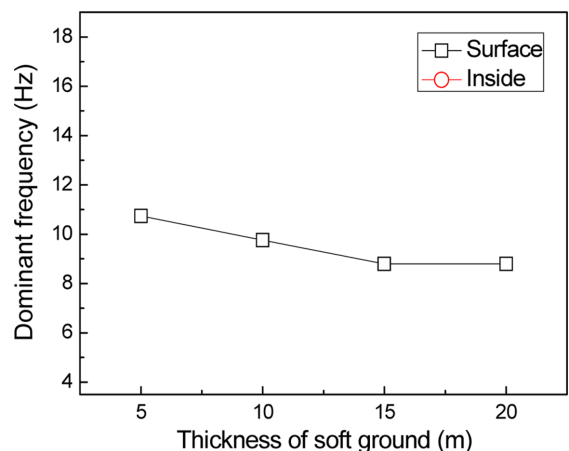


Fig. 13 Dominant frequency depending on thickness of soft ground using impact load

6. 열차하중을 이용한 파 전파해석

파일슬래브구간에서 열차하중이 재하되었을 때의 진동특성을 평가하기 위하여 실측 열차하중을 이용한 해석을 수행하였다. 열차하중은 경부고속철도 2단계구간에서 계획한 고속열차(KTX)의 운중값으로서 재하 패턴은 아래의 Fig. 14와 같다. 해석시의 시간단축을 위하여 세대의 대차 통과시간만 사용하였다. 열차주행속도는 300km/h이며 나머지 해석조건은 5절과 동일하다.

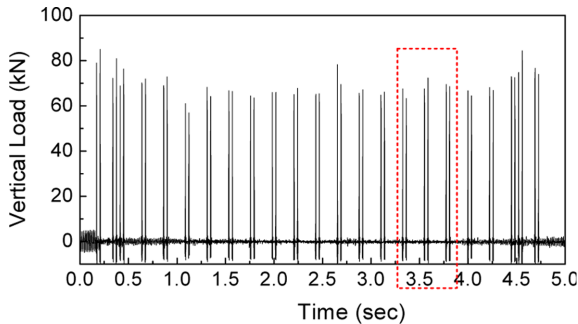


Fig. 14 Field measured train load (300km/h)

6.1 성토고의 높이에 따른 진동특성

충격하중을 적용했을 때와 동일조건하에서 하중조건만 실측 열차하중을 적용하여, 성토층의 상부면(Fig. 3의 1번위치)과 성토층내부(Fig. 3의 2번위치)에서의 진동가속도의 크기와 주파수특성을 검토하였다. Fig. 15는 성토높이 변화에 대한 성토층 표면과 성토층 중심에서의 최대수직진동가속도의 값을 나타내었다.

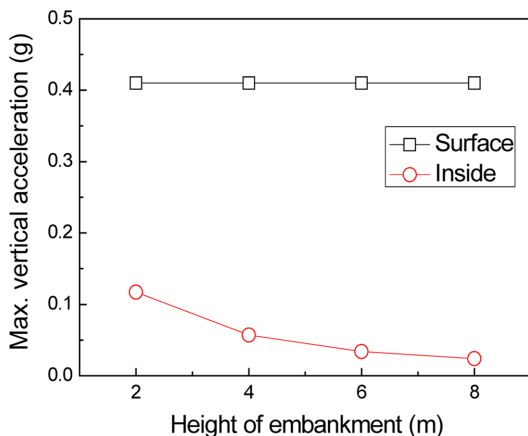


Fig. 15 Max. acceleration depending on embankment height using actual train load

Fig. 15에서 성토고의 높이별 표면에서의 최대 수직진동가속도값의 범위는 0.41g로 성토높이가 높아져도 진동에너지의 크기는 변화가 없다. 성토층 내부에서는 가속도는 0.024-0.12g로서 성토고가 8m에서 2m로 낮아질 경우 진동

가속도에너지가 약 5배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 성토고의 증가에 따른 재료감쇠 및 거리감쇠에 의한 영향으로 충격하중이 재하하였을 경우와 유사한 경향을 나타낸다. Fig. 16은 각 성토층의 높이별 진동가속도의 탁월주파수를 나타낸 그림으로서 성토층의 표면과 내부에서의 탁월주파수는 동일하다. 충격하중이 재하하였을 경우와 유사한 경향을 나타내지만 성토고가 낮은 경우에는 탁월주파수가 18Hz로 충격하중을 사용한 경우보다 크게 계산되었다.

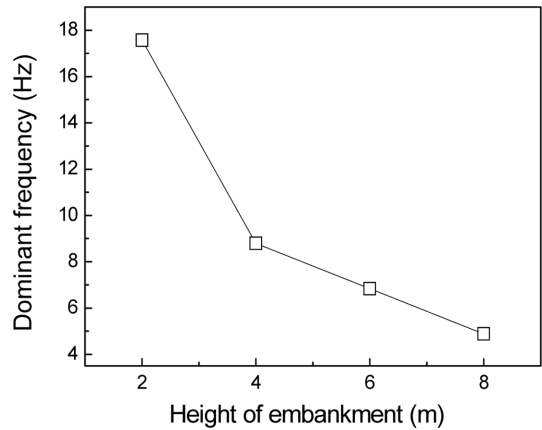


Fig. 16 Dominant frequency depending on embankment height using actual train load

6.2 연약지반의 심도별

다음의 Fig. 17과 Fig.18은 연약지반 심도별 진동가속도의 전파특성을 평가하기 위하여 성토층의 표면(Fig. 3의 1번위치)과 성토층내부(Fig. 3의 2번위치)에서의 진동가속도의 크기와 주파수특성을 검토하였다. 검토 결과, 충격하중조건과 마찬가지로 진동가속도의 크기와 탁월주파수의 변화는 연약지반 심도와는 상관성이 없는 것으로 나타났다.

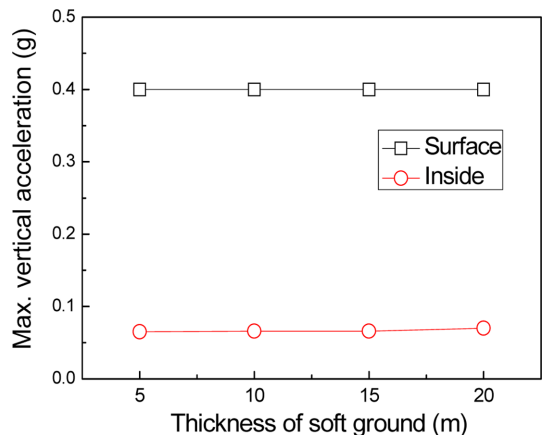


Fig. 17 Max. acceleration depending on thickness of soft ground using actual train load

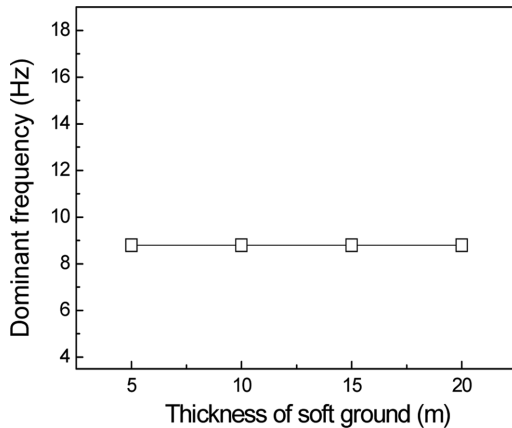


Fig. 18 Dominant frequency depending on thickness of soft ground using actual train load

7. 결 론

본 논문에서는 파일슬래브가 설치된 콘크리트레도 토공구간에서의 진동전파특성을 검토하였다. 충격하중 및 실측 열차하중을 사용하여 파일슬래브구조 내부에서의 반사특성, 성토층 및 연약지반 조건에 따른 진동특성을 평가하였다. 각 해석 결과를 바탕으로 파일슬래브구조에서의 진동특성을 정리하면 다음과 같다.

1) 파일슬래브 구조내에서 입력하중에 의해 발생한 진동에너지는 일부를 파일을 통하여 하부지반으로 전달되고 일부는 슬래브를 반사층으로 다중반사되는 것으로 나타났다. 슬래브층의 반사효과로 인하여 발생한 내부반사파는 심도에 따라 최대 2배 이상 진동가속도를 증가시키는 것으로 나타났다.

2) 충격하중을 입력하중으로 이용하여 성토층의 높이별(2-8m) 및 원지반의 심도별(5-20m) 진동특성을 검토하였다. 성토 내부에서의 진동가속도는 성토고가 2m인 경우에는 0.2g 이고 8m인 경우에는 0.06g로 성토고가 높을수록 진동가속도는 내부감쇠의 영향으로 지수함수적으로 감소하는 것으로 나타났으며 원지반 조건은 진동특성에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 충격하중에 의한 파일슬래브구조의 탁월주파수는 성토층의 높이 및 재료강성에 의해 결정되는 것으로 나타났다.

3) 실측 열차하중 및 노반조건을 고려하여 해석을 수행한 결과, 성토층 내부에서의 가속도는 0.024-0.12g로서 성토고가 8m에서 2m로 낮아질 경우 진동가속도 최대값이 약 5배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 성토고가 낮아짐에 따른 내부감쇠의 감소 및 진동에너지의 소산부족으로 인한 영향으로 충격하중을 재하하였을 경우와 유사한 경향을 나타내었다.

침하억제의 목적으로 처음으로 도입되어 적용되고 있는 파일슬래브구조의 진동특성에 대한 해석적인 검토결과, 진동특성은 차량의 하중조건, 구조물의 기하학적 조건 및 재료에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 보다 정확한 분석을 위해서는 현장실험 결과가 요구되지만, 현재까지의 검토결과를 바탕으로 판단할 때, 파일슬래브가 적용된 노반에서 적정 성토고가 확보된다면 성토체의 진동에너지 증가가

크지 않지만 성토고가 낮은 경우에는 진동에너지의 증가가 예상되기 때문에 별도의 진동저감방안이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] R. Katzenbach, O. Reul (1997) Theme Lecture: Design and Performance of Piled Rafts, *Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Vol. 4, pp. 2253-2256.
- [2] H.G. Poulos (2001) Piled raft foundation: design and applications, *Geotechnique*, 51(2), pp. 95-113.
- [3] R. Katzenbach, A. Schmitt, J. Turek (2005) Assessing settlement of high-rise structures by 3D simulations, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20, 221-229.
- [4] O. Reul, M.F. Randolph (2004) Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(1), pp. 1-13.
- [4] Railway Design Standard (2011) Korea Rail Network Authority.
- [5] L. Sanctis, A. Mandolini (2006) Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(12), pp. 1600-1610.
- [6] I.W. Lee, S.K. Hwang, S.H. Joh (2010) Vibration Reduction Efficiency of the Wave-Guide typed Roadbed Structures using the Attenuation Coefficient, *Korea Society for Railway Spring Conference*, Changwon.
- [7] S.C. Yang, E. Kim (2009), Optimization of Fastener Stiffness in Concrete Track of High Speed Railway, *Korea Society for Railway Spring Conference*, Kyungju, pp. 2756-2763.
- [8] J.I. Kim, S.C. Yang, Y.T. Kim, S.B. Suh (2005) A Study on Determination of the Minimum Vertical Spring Stiffness of Track Pads in Korea High Speed Railway, *Korea Society for Railway Spring Conference*, Uiwang, pp. 7-12.
- [9] I.W. Lee (2011) Dynamic Response Characteristics for Two-layered Trackbed Structure by Train Load, *Journal of the Korea Society for Railway*, 14(2), pp. 160-166.

접수일(2012년 9월 4일), 수정일(2012년 11월 30일),
게재확정일(2013년 1월 8일)

Il Wha Lee : iwlee@krri.re.kr

Advanced Infrastructure Research Team, High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Sung Jin Lee : geolsj@krri.re.kr

Advanced Infrastructure Research Team, High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Su Hyung Lee : geoxlee@krri.re.kr

Surface Traffic System Research Team, Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Kang Myung Lee : kmlee@krri.re.kr

Advanced Infrastructure Research Team, High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea