

고속철도 파일슬래브공법 적용구간에서의 파전파해석 Wave Propagation Analysis for Pile-Slab Section on High Speed Railway

이강명†
Kang-Myung Lee

이일화*
Il-Wha Lee

ABSTRACT

This paper reviewed wave propagation of train vibration based on the study of high speed railway soft ground section with pile slab construction. In a filed of railway, concrete track has been adapted in a railway construction. And in order to maintain its track, soil improving method was required to control residual settlement. Within many soft ground settlement prevention techniques, pile slab method has an effect of minimizing residual settlement of soft ground. This is possible using support embankment load method by construct pile slab or cap the upper soft ground.

This paper reviewed vibration wave characteristic of soft ground section with pile slab using numerical analysis application through finite element analysis. Pile slab method is established between high stiffened soft ground and embankment this creates a possibility of vibration block or slab amplification. Thus analyzed of wave propagation was done with roadbed and structure property to confirm application performance of pile slab method of high speed railway structure.

1. 서론

국내에서 철도건설에 콘크리트케도를 도입함에 따라 케도 유지관리확보 및 건설비절감을 위하여 연약지반 상에서 케도의 잔류침하량을 억제할 수 있는 지반개량 공법이 요구되고 있다 파일슬래브공법은 콘크리트케도에 적용할 수 있는 제한된 연약지반처리공법중 하나로서 연약지반에 말뚝을 타설한 후 상부에 파일슬래브를 시공하여 성토하중을 지지시키는 공법이다 파일슬래브공법은 호남고속철도구간에 약 1km에 걸쳐 시공되어 있는데, 강성이 높고 변위가 허용되지 않는 콘크리트 슬래브가 연약지반과 성토층 사이에 설치되어 파전파에 대한 차진효과를 유발할 가능성이 있다 이러한 차진효과는 하부층으로 전파하는 철도진동을 슬래브의 상부에서 다중반사시켜 성토층 내부에서의 진동가속도 값이 커질 가능성이 제기되었다. 열차에 의해 발생한 진동이 증폭된다면 고속철도 구조물에 심각한 영향을 미치게 될 것이고 향후 유지보수 측면에서도 어려움을 겪을 우려가 있기 때문에 사전에 고속철도 구조물로서의 파일슬래브공법의 적용 성능을 확보하기 위하여 노반 및 구조물의 특성을 고려하여 파전파 특성을 검토하였다.

† 교신저자, 과학기술연합대학원대학교, 석사과정
E-mail : kmlee@krri.re.kr

* 한국철도기술연구원, 고속철도연구본부

2. 파일슬래브공법

연약지반 처리공법에는 압밀축진, 침하억제 등의 방법이 있다. 이 중 파일슬래브 공법은 침하억제 방식의 하나로, 연약지반 내에 파일을 설치하고, 파일 두부 전면을 철근콘크리트 슬래브로 연결하여 파일 상부의 성토하중 전부를 지지층인 암반층까지 직접 전달시키므로 연약지반에는 성토하중이 전달되지 않는 특성을 가지고 있다. 추가적으로 파일슬래브 공법은 연약지반의 측방유동에 말뚝이 저항함으로써 기초지반의 강성을 증대시키는 효과가 있으며, 교대 배면의 잔류침하를 방지하므로 구조물과 성토지반 사이의 단차를 방지할 수 있다. 아래의 그림 1은 파일슬래브공법의 개략적인 시공형태를 나타낸다.

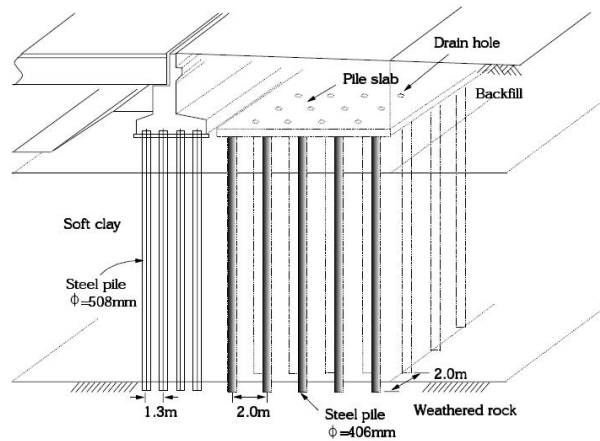


그림 1. 파일슬래브공법의 시공개요도

3. 유한요소해석모델

철도노반의 동적응답을 검토하기 위하여 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 검토모델은 그림 2와 같이 암반위의 지반층내에 파일을 생성하고, 파일 두부를 감싸고 있는 콘크리트 슬래브를 표현하였다. 그 위로 성토층, HSB층, TCL층의 순서로 모델을 생성하였다.

검토방법은 다음의 조건으로 해석을 수행하였다. 성토층의 두께(3m, 10m)와 파일의 설치유무 및 파일 슬래브의 설치유무의 조건으로 시간영역에서의 진동의 크기와 주파수 영역에서의 진동의 크기를 비교하였다. 해석 모델과 전체 모델의 치수는 그림 2과 같다. 요소의 크기는 10x10cm, 총 해석시간은 1.5초, 적분시간간격은 6.59×10^{-4} 초 이다. 궤도는 호남고속철도 2단계 궤도, 파일 및 노반구조를 사용하여 구성하였다. 해석단면의 양쪽측면과 하부경계는 응력파의 반사 및 굴절을 제거하기 위하여 무한요소를 적용하였다. 모델링에 적용된 궤도노반의 해석조건 및 물성치는 아래의 도표 1 과 도표 2 에 정리하였다.

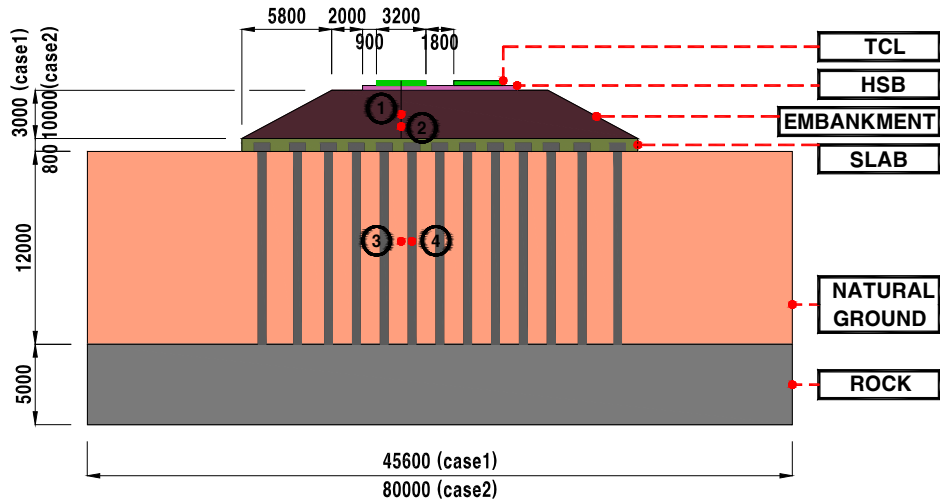


그림 2. 해석 모델과 전체 모델 치수

도표 1. 각 case 별 해석 조건

	탄성계수 (MPa)	밀도 (N/m ³)	Poisson Ratio	두께 (m)
TCL층	24500	2450	0.21	0.3
HSB층	23500	2350	0.21	0.3
성토층	60	1900	0.33333	3, 10
파일	35000	2740	0.21	12.5
파일슬래브	23025	2450	0.21	0.8
지반층	1.9, 100	1900	0.33333	12
암반층	1000	2100	0.21	5

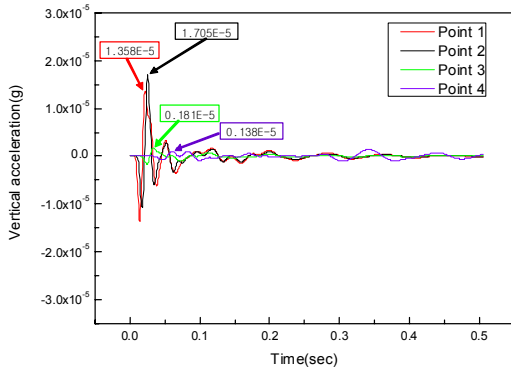
도표 2. 퀘도노반의 각 층별 물성치

	성토높이	파일타입	파일슬라브	지반종류
case1	3m	파일설치	설치	연약지반
case2	10m	파일설치	설치	연약지반
case3	3m	파일미설치	미설치	강성지반
case4	3m	파일설치	미설치	연약지반

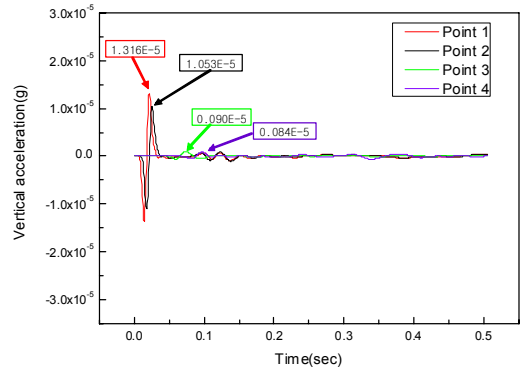
4. 해석결과

성토층의 탄성계수는 60MPa로 일정하며 해석에 적용된 성토층의 두께와 파일의 설치유무 및 파일슬래브의 설치유무의 조건을 변화시키면서 시간영역에서의 위치별 진동가속도의 크기와 주파수 영역에서의 주파수의 변화를 검토하였다. 동적응답특성의 검토 위치는 그림 2의 1,2,3,4로 표시하였다. 위치 1과 2는 각각 성토층의 중간위치와 3/4에 해당하는 위치이며, 위치 3과 4는 지반층의 중간부분의 지반층내 지

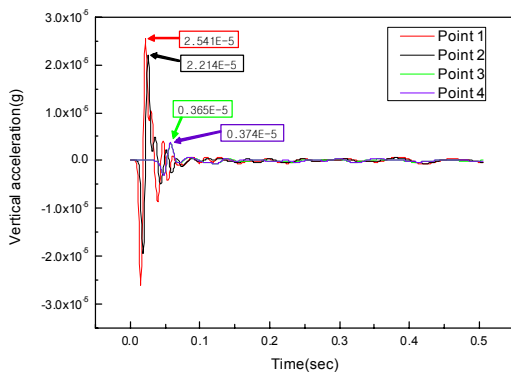
점과 파일 위치이다. 그림 3은 해석조건에 따른 각 측정위치에서의 진동가속도의 응답이다. 해석조건중 성토높이에 따른 수직진동가속도의 값을 비교해보았을 때, case 1의 (a)와 (b)에서 성토층의 1/2에 위치한 1번 지점에서는 값의 차이가 미미하였고, 성토층의 3/4에 해당하는 2번 지점에서 성토층의 높이가 3m인 case 1에서의 값이 10m인 case 2의 값보다 약1.6배 큰 값을 나타내었다. 또한 지반층내에서의 경우는 case 1이 case 2보다 약2배 큰 값을 나타내었다.



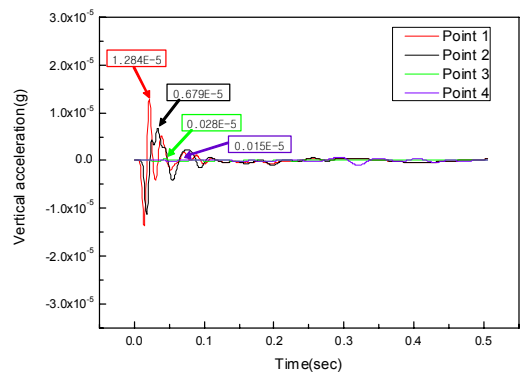
(a) case1의 각 지점에서의 수직진동가속도



(b) case2의 각 지점에서의 수직진동가속도



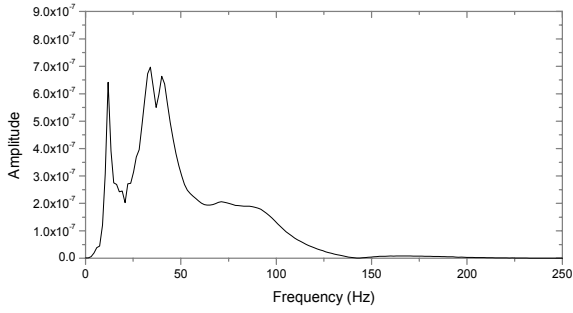
(c) case3의 각 지점에서의 수직진동가속도



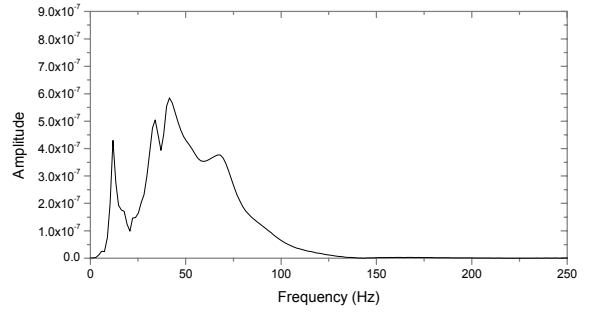
(d) case4의 각 지점에서의 수직진동가속도

그림 3. 각 지점에서의 해석 조건별 수직진동가속도

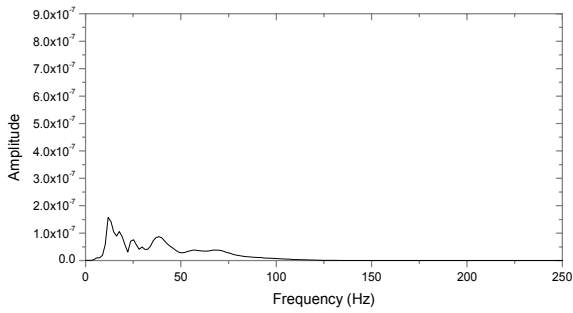
파일슬래브 설치유무 조건으로 비교하였을 때, 그림 3에서 파일슬래브 상부 성토층의 수직진동가속도 값이 파일슬래브 하부의 지반층의 값보다 case 1에서는 약7~12배, case 2에서는 약12~14배, case 3에서는 약6배, case 4에서는 약24~85배 가량 크게 나타났다. 다음으로 case별 각 지점에서 파일슬래브가 설치되어 있는 경우와 설치되어 있지 않는 경우의 수직진동가속도를 비교해보았다 1번 지점에서는 약2배, 2번 지점에서는 약1.3배, 3번 지점에서는 약2~13배, 4번 지점에서는 약2.7~25배의 차이가 나타났다. 본 해석의 초기 가정은 열차하중이 성토층으로 전달되어 발생한 진동이 파일슬래브의 상부에서 반사되고 성토층 상부에서 다시 반사되는 형식으로 성토층 내부에서 반복적인 작용이 일어나고, 그에 따라 성토층 내부에서의 진동가속도 값이 커질 것으로 예상하였으나, 파일슬래브를 설치할 경우(case1,2,4)의 진동가속도 값이 파일슬래브가 설치되지 않았을 경우(case3)의 약 50% 수준을 나타내었다. 이는 열차하중으로 발생한 진동이 파일슬래브 상부에서 반사되지 않고 슬래브 내부로 흡수되었기 때문이라고 판단된다. 그림 4 와 5는 성토층의 1번 지점에서와 지반층인 3번 지점에서의 수직진동가속도의 값을 FFT 변환한 주파수응답특성을 나타내었다.



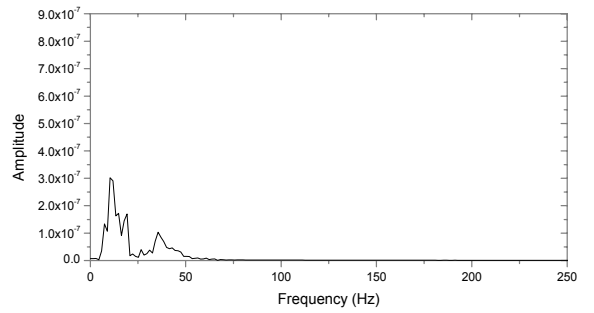
(a) case 1의 1번 지점에서의 FFT변환 주파수



(b) case 1의 2번 지점에서의 FFT변환 주파수

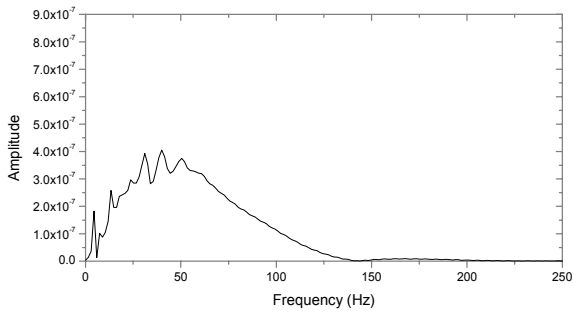


(c) case 1의 3번 지점에서의 FFT변환 주파수

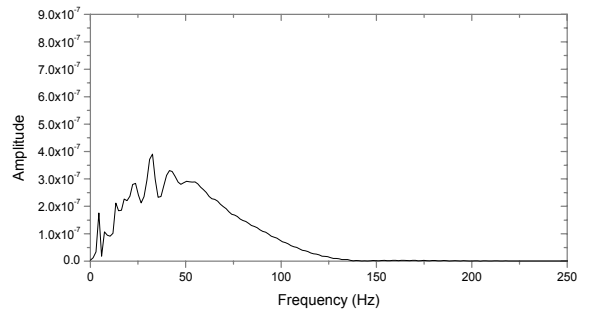


(d) case 1의 4번 지점에서의 FFT변환 주파수

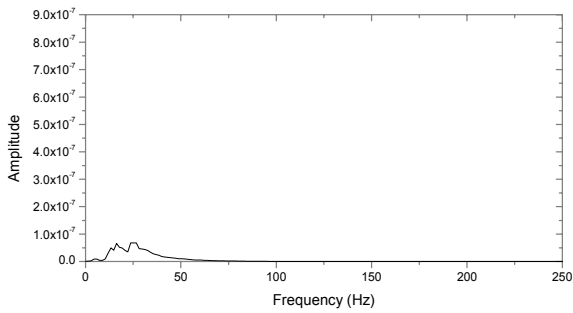
그림 4. case 1의 각 지점에서의 FFT변환 주파수



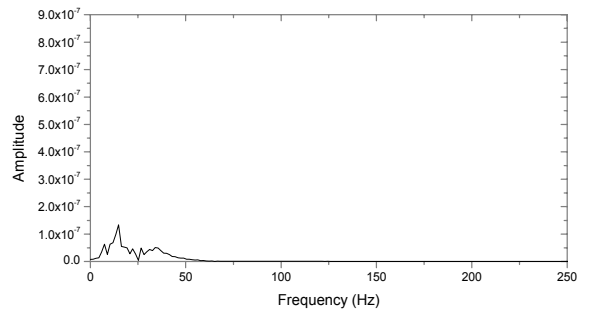
(a) case 2의 1번 지점에서의 FFT변환 주파수



(b) case 2의 2번 지점에서의 FFT변환 주파수

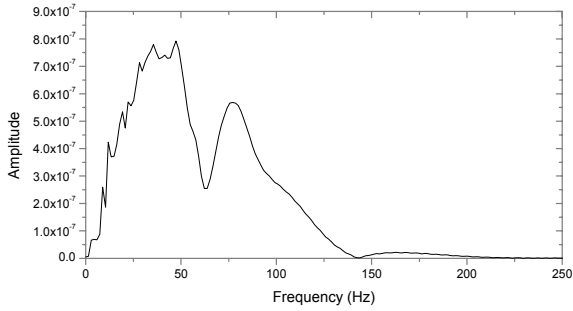


(c) case 2의 3번 지점에서의 FFT변환 주파수

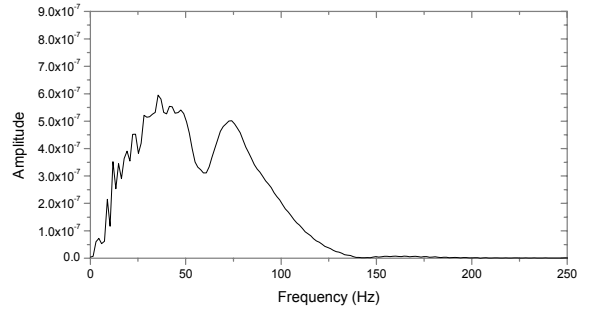


(d) case 2의 4번 지점에서의 FFT변환 주파수

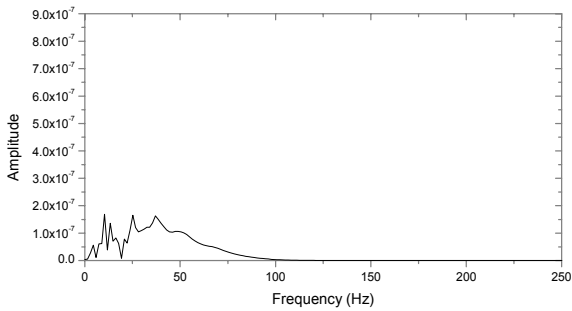
그림 5. case 2의 각 지점에서의 FFT변환 주파수



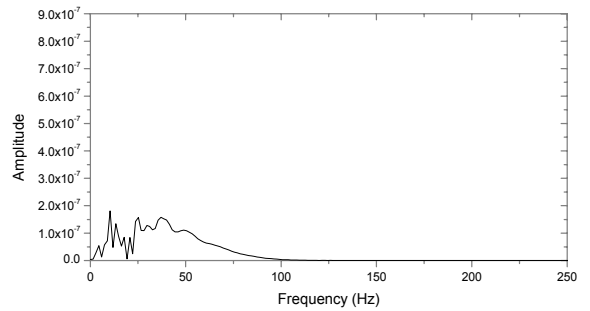
(a) case 3의 1번 지점에서의 FFT변환 주파수



(b) case 3의 2번 지점에서의 FFT변환 주파수

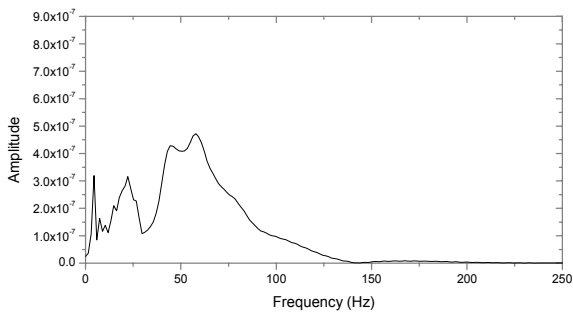


(c) case 3의 3번 지점에서의 FFT변환 주파수

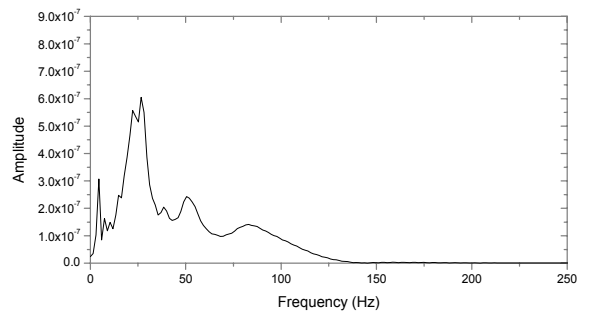


(d) case 3의 4번 지점에서의 FFT변환 주파수

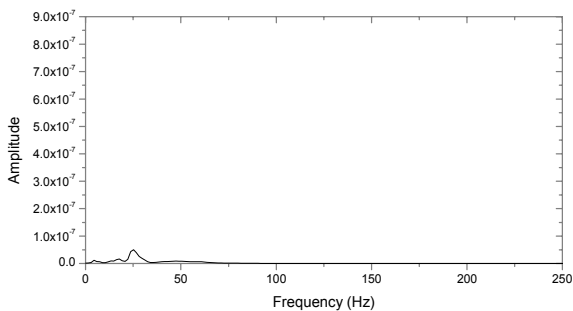
그림 6. case 3의 각 지점에서의 FFT변환 주파수



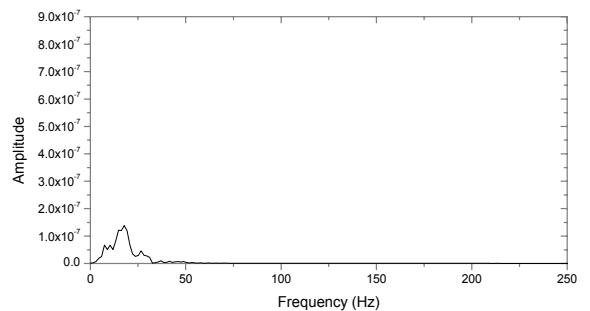
(a) case 4의 1번 지점에서의 FFT변환 주파수



(b) case 4의 2번 지점에서의 FFT변환 주파수



(c) case 4의 3번 지점에서의 FFT변환 주파수



(d) case 4의 4번 지점에서의 FFT변환 주파수

그림 7. case 4의 각 지점에서의 FFT변환 주파수

다음의 그림 8은 성토층 토피 3m를 상단부터 하단까지 30cm 간격으로 나누어 위치에 대한 해석조건 별 최대 수직진동가속도를 나타내었다. case 1은 성토층의 하부로 내려가면서 점점 감소하다가 중간부분인 1.5m 부분에서 증가한 후 다시 감소하였다. case 2는 큰 변화를 보이지 않으면서 점점 감소하였다.

case 3은 상부에서 1m인 부분까지 급격하게 감소하고 이후로 하부까지는 다른 case 와 비슷한 기울기로 감소하였다. case 4는 2m 부분까지 감소한뒤 증가하는 결과가 나타났다

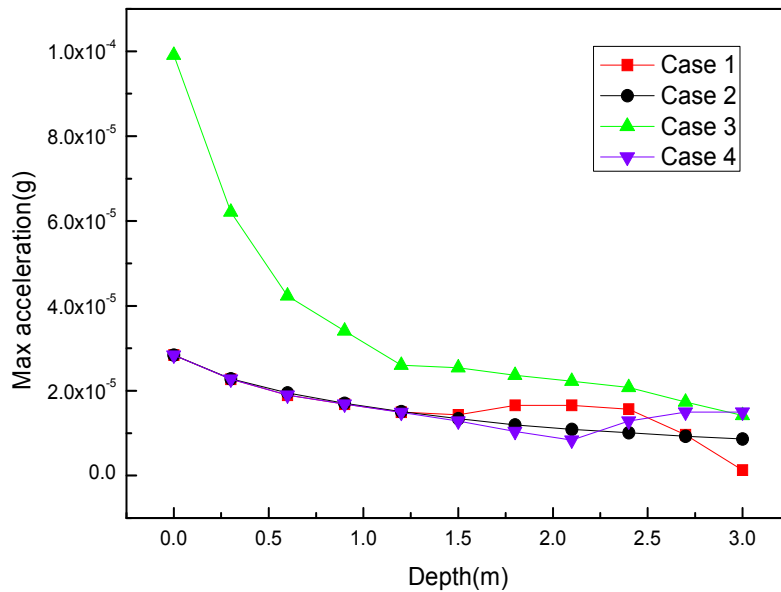


그림 8. 성토층 깊이에 대한 해석조건별 최대 수직진동가속도

5. 결 론

본 논문은 연약지반구간에 적용된 파일슬래브 구간에서 철도 진동의 진파특성을 분석하기 위한 기초연구로서, 여러 가지 영향조건중 성토층의 두께(3m, 10m)와 파일의 설치유무 및 파일슬래브의 설치유무의 조건으로 성토층 및 지반층에서의 파진파특성을 검토하였다. 해석적 검토 결과 파일슬래브를 설치할 경우(case1,2,4)의 진동가속도 값이 파일슬래브가 설치되지 않았을 경우(case3)보다 심도에 따른 차이는 있으나 약 50% 수준인 것으로 나타났다. 이는 열차하중으로 발생한 진동이 슬래브 상부에서 반사되어 증폭되는 값보다 파일슬래브의 구조적 특성에 의해서 방진효과가 더 큰 것으로 나타났다

참고문헌

1. 이일화, “열차하중에 의한 이층노반구조의 동적 응답특성”, 한국철도학회논문집, 14권, 2호, pp.160-166, 2011.
2. 이수형, “수치해석을 통한 성토지지말뚝에 대한 토목섬유 보강 효과 분석”, 한국철도학회논문집, 12권 2호, pp.276-284, 2009.
3. Kenji Watanabe, Takaki Matsumaru, Masaru Tateyama, "Soft ground improvement method for railway embankment using cement-mixed gravel and geosynthetic", International symposium Railway geotechnical engineering, Paris, pp.289-396, 2011.