

노상 성토조건에 의한 다짐영향

The Effects of Embankment Condition of Subgrade on Compaction.

노한성¹⁾, Han-Sung Roh, 김태수²⁾, Tae-Soo Kim, 최영철¹⁾, Young-Chul Choi, 백종은²⁾, Jong-Eun Baek

¹⁾한국도로공사 도로연구소 지반연구그룹 책임연구원, Chief Researcher, Geotechnical Research Division, Highway Research Center, Korea Highway Cooperation

²⁾한국도로공사 도로연구소 지반연구그룹 연구원, Researcher, Geotechnical Research Division, Highway Research Center, Korea Highway Cooperation

SYNOPSIS : This paper describes the feasibility of compacting subgrade layer in thicker lifts than currently permitted as 20 cm. This project involved constructing and testing a full scale test section in highway. Soil stiffness in field was evaluated by a nondestructive testing method, called Geogage. Quality control tests and FE Analysis were also conducted. Typical dynamic compaction roller of 11ton weight is applied for full scale test and a Mohr-Coulomb model and plane strain condition are used for FE Analysis. The results showed that compaction-induced stress and dissipated energy are mainly depend on depth of soil and it could be possible to increase thickness of a lift.

Key words : Lift thickness, Full scale test, Compaction, Induced stress

1. 서론

토공의 다짐작업은 소정의 지지력 및 강도를 발휘하기 위해서 효과적으로 적용되는 공법이다. 이러한 다짐작업에 대한 기술은 경부고속도로의 건설 이후 토목공법의 개발 및 개선과 더불어 발전되어 왔다. 그러나, 토공장비나 다짐기술의 수준과는 무관하게 노체과 노상의 일반 토사 다짐 성토두께는 각각 30cm, 20cm로 일률적으로 규정 사용하고 있다. 따라서, 고속도로 건설시의 시공성과 경제성을 극대화하기 위해서는 현행의 다짐관련 장비 및 향후의 대형장비에 대한 효율적 사용을 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 고속도로 건설시 토공다짐에 사용되는 대표적 장비인 11톤 진동롤러에 대하여 현장시험과 수치해석을 실시하여 성토층의 두께와 진동롤러의 통과회수 등이 노상에 다짐에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 현장다짐 시험

성토두께와 다짐회수가 노상의 다짐에 미치는 영향을 분석하기 위해서, 성토두께를 4단계로 변화시키고 대형진동롤러를 20회 통과시키면서 지반에 가해지는 다짐압을 측정하였다. 그리고, 이러한 다짐이 지반의 강성에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 지반의 탄성계수를 측정하였다. 성토두께에 따른 다짐도와 다짐압의 관계를 분석하기 위해서 1차 다짐된 성토를 굴착하여 15cm에서 86cm까지의 깊이에 동적토압계를 매설하고 되메임 작업을 실시한 후, 진동롤러의 최대진동압을 유지하면서 다짐을 실시하면서 다짐압을 측정하였다. 또한, 다짐후 지반의 다짐정도를 파악하기 위해서 들밀도 시험이나 평판재하시험을 실

시하였다. 그러나, 성토두께가 커짐에 따라 기존의 시험으로 성토지반에 대한 대표성을 확보하기 어렵고 또한 시험시간이 많이 소요되므로 추가적으로 진동을 이용한 현장지지력 측정장비를 이용하여 지반의 탄성계수를 측정하였다.

2.1 지반조건

현장토질은 화강풍화토로 통일분류법으로는 SW에 해당하며, 입도분포는 매우 양호하다($C_u = D_{60}/D_{10} = 11.0$, 4번체 통과량 = 89%, 200번체 통과량 = 5.5%). 자연함수비는 4.9%으로 최적함수비 9.5%에 비해 매우 낮았으며, D 다짐법에 의한 실내다짐시험 결과는 최적함수비 9.2%에서 최대건조밀도는 19.71 kN/m^3 이고, 수정 CBR 값이 17.8으로 현행의 고속도로 전문 시방서에서 규정된 노상의 재료 조건을 충족하고 있다.

2.2 다짐계측 방법

성토두께에 따른 다짐도의 변화와 다짐압을 측정하기 위해 토압계 계획 매설심도는 20cm, 40cm, 60cm, 80cm이고, 각 심도마다 2개의 토압계 센서를 매설하는 것으로 하였다. 토압계는 설계 매설심도보다 토압계 센서의 두께를 고려하여 5cm 정도로 더 굴착하고, 모래를 얇게 포설하여 토압계의 수평을 맞추어 설치하였다. 다짐시행후 기준 레벨점을 측정함으로써, 성토두께를 산정하였으며, 결과를 그림 1에 표시하였다.

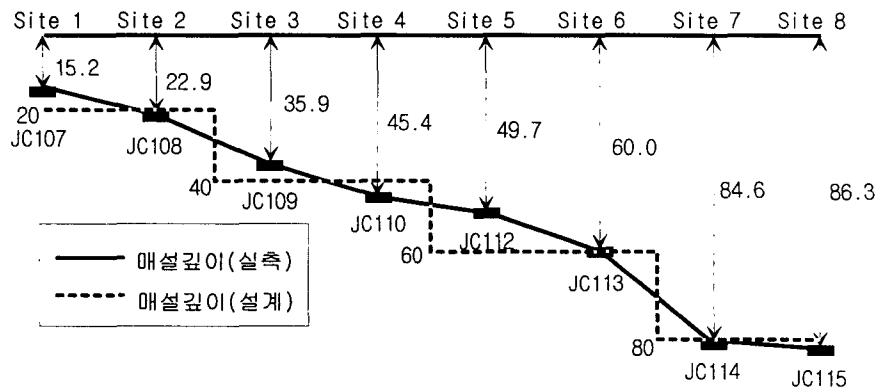


그림 1 지점별 성토두께 및 계측기 번호

다짐작업은 성토두께가 작은 Site 1부터 진동롤러가 진입하여 계측기의 중심을 철륵의 중심이 통과한 후, 타이어 롤러가 통과하였다. 진동롤러의 타이어부가 Site 8을 지나 응력이 토압계센서에 전달되지 않는 충분한 지점까지 주행 후, 후진으로 주행하여 각 지점들을 통과하여 출발점까지 주행하도록 하였다. 대형 다짐진동장비를 총 10회 왕복 주행하였다.

2.3 계측결과

2.3.1 동적 수직토압

계측결과 중 일례로 왕복회수가 5회 인 경우의 동적 수직토압값을 각 지점별로 그림 2에 나타냈었다. 그림 3으로부터 성토두께가 증가함에 따라서 동적 수직토압이 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 성토

두께가 작은 지점에서는 철륵의 진동에 의해서 발생한 동적 수직토압이 타이어 롤러에 의해서 발생하는 동적수직토압보다 상대적으로 크게 나타났으며, 성토두께가 클수록 철륵과 타이어 롤러에 의한 동적 수직토압의 차가 감소하는 경향을 나타내었다.

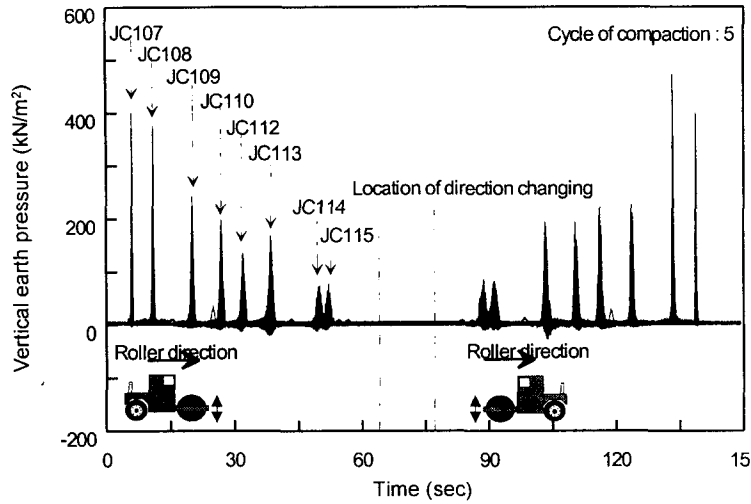


그림 2 5회 왕복시 각 지점에서 발생하는 동적 수직토압

그림 3은 각 지점에서 다짐회수에 따른 동적 수직토압의 최대치를 나타낸 것이다. 깊이에 상관없이 초기 2회 왕복 주행시까지의 동적 다짐압이 증가하는 추세를 보이고 있으며, 성토두께가 작을수록 큰 값을 보이고 있다. 성토두께가 22.9cm 인 경우(지점 2), 역시 4회 주행시 동적 다짐압이 최고치 4.2kg/cm² 정도로 이며, 이는 심도 15.2cm와 비교하여 75% 정도의 값을 가진다. 20회 다짐시까지 최고치의 증감은 있으나, 대략 4.0kg/cm² 정도에 수렴하는 경향을 보이며, 이는 성토두께가 15.2cm와 비교하여 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 성토두께가 35.9cm와 45.4cm의 경우(지점 3, 4), 최고치에 있어서는 성토두께가 15.2cm와 22.9cm의 경우와 비슷한 경향을 나타내며, 최고치도, 성토두께가 45.4cm의 경우가 성토두께가 35.9cm의 75% 선을 나타내고 있으며, 주행횟수에 따른 다짐압의 증감도 비슷한 경향을 보이고 있다. 성토두께가 35.9cm의 경우는 2~3kg/cm²사이에서 수렴하는 경향을 보이는 반면, 성토두께가 45.4cm의 경우에는 2kg/cm²부근에서 수렴하는 경향을 보인다. 두 지점 모두 19, 20번째 주행에서 대폭적인 최고치의 감소가 나타난다. 성토두께가 49.7cm와 60.0cm의 경우(지점 5, 6), 성토두께차가 10.3cm 정도이지만, 동적 다짐압의 최고치가 2.0kg/cm²정도로 거의 비슷하며, 다짐시 주행횟수에 의한 다짐압의 증감형태도 유사하며, 두 지점 모두 1.5kg/cm²정도에서 수렴하는 경향을 보인다. 성토두께가 35.9cm와 45.4cm의 경우와 비교해서, 두 경우 모두 성토두께차가 10cm내외로, 지점 3과 4인 경우에는 각 성토두께별 동적 다짐압의 최고치의 차이가 25% 이상인 반면, 지점 5와 6의 경우에는 거의 차이가 나지 않

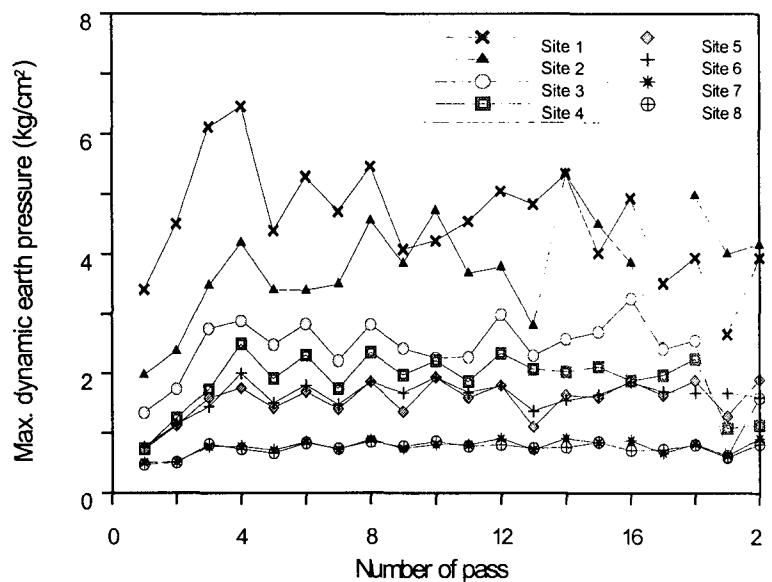


그림 3 다짐회수와 동적토압

고 있으며, 수렴하는 경향은 모두 설계심도 모두 같은 경향을 보인다. 설계두께가 84.6cm, 86.3cm의 경우(지점 7, 8)에는 3회 주행시에서 동적 다짐압의 최대치 0.9 kg/cm²가 나타나며, 그 이후로는 다짐횟수에 대한 다짐압의 증감이 약간 나타나나, 전반적으로 최대치보다 약간 낮은 상태에서 유사한 값인 0.7~0.8kg/cm²을 유지하는 것으로 나타났다. 그러므로, 동적 수직토압이 최대 성토두께(86cm)보다 큰 곳까지 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

그림 4는 성토두께에 따른 주행회수별 동적 수직토압과 Boussinesq의 식에 의해서 구한 수직응력을 비교하여 나타낸 것이다. 성토두께가 클수록 동적 수직토압이 급격히 감소하여 성토두께가 40~50cm인 지점에서 변곡점이 형성되는 것을 알 수 있다. 또한, 현장에서 측정된 동적 수직토압과 Boussinesq의 식에 의한 수직응력을 비교하면, 전체적으로 유사한 경향을 나타내고 있으나, 성토두께가 작을수록, 다짐회수가 많을수록 동적 수직토압이 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림 5는 성토두께가 22cm인 지점에서 발생한 지중 응력을 기준으로 각 성토심도 지중응력의 비를 나타낸 것이다. 성토두께가 15.2cm인 지점 1의 경우, 가해진 응력의 비가 0.8~1.9사이이고 최대응력비는 1.9로 절대 심도 10cm 정도의 차이로 두배에 이르는 응력이 가해짐을 알 수 있다. 또한, 응력의 편차가 매우 극심함을 알 수 있다. 이것은 성토두께가 작은 관계로 현장에서 가해지는 진동의 방향, 지반의 굴곡 등에 의한 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 전체적으로 성토두께가 더 클수록 응력비는 감소하는 추세를 보이며, 성토두께 50cm의 경우에는 응력비가 0.3~0.7사이의 값을 가지며, 성토두께 80cm의 경우, 응력비의 편차가 다짐횟수에 상관없이 크지 않고, 응력비가 0.2에 수렴하는 것을 알 수 있다.

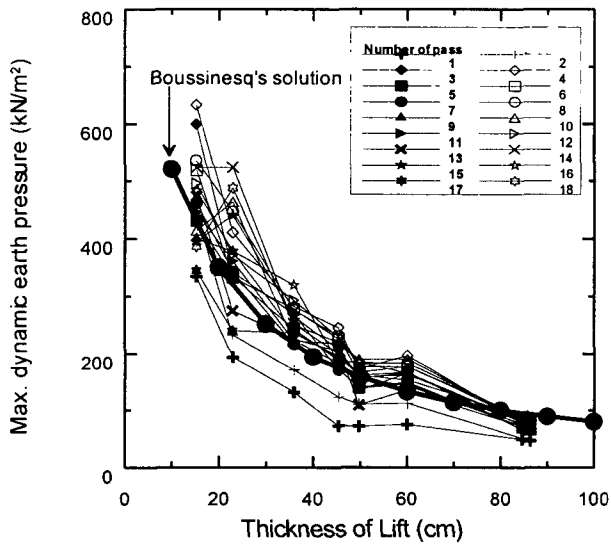


그림 4 성토두께에 따른 최대 동적수직토압
(현장시험 및 Boussinesq 방법)

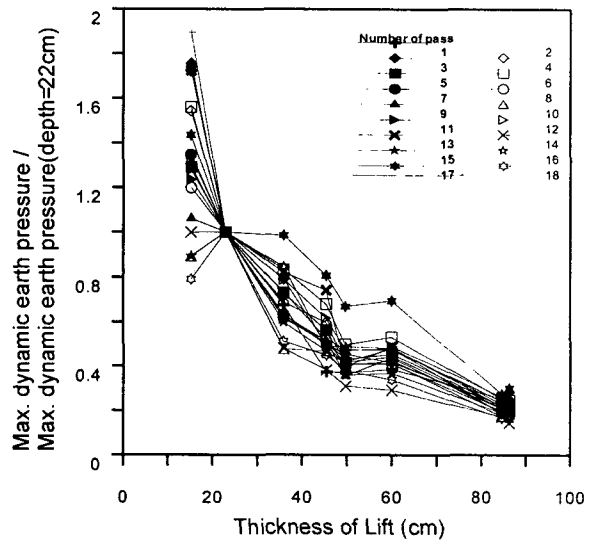


그림 5 깊이와 최대 발생토압비
(성토두께 : 22cm기준)

2.3.2 현장관리시험

그림 6은 현장밀도 시험으로부터 구한 다짐도와 성토두께와의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림 5로부터 노상토 다짐을 기준으로 지점 1, 2에서만 현 고속도로공사 전문시방서상의 품질관리기준인 95%를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 시험시공 성토시의 다짐상황이 자연함수비가 최적 함수비보다 매우 낮은 상태였기 때문에 다짐횟수에 의한 성토체의 역학적 특성 개선효과를 판단하기에는 곤란하다. 또한, 성토체 표면에서 10~15cm 깊이에서 측정된 현장밀도는 성토두께가 클수록 확연히 감소하는 경향을 보인다. 그림 7은 대형 진동롤러의 다짐회수 증가에 따른 노상의 탄성계수변화를 미소진동을 이용하는 Geogage의 결과이다. 1회 왕복다짐시의 경우, 노상의 탄성계수가 23.83~28.45MN/m²의 값을 나타냈으

며, 10왕복다짐시의 경우, 30.71~43.98MN/m²의 값을 나타내었다. 따라서, 진동다짐장비의 다짐횟수에 따른 지지력이 전반적으로 증가하고 있으나, 증가경향이 명확하게 비례적이지는 않았다. 또한, 성토두께에 의한 지지력의 추세도 성토두께가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 비교적 분산이 크게 나타나고 있다.

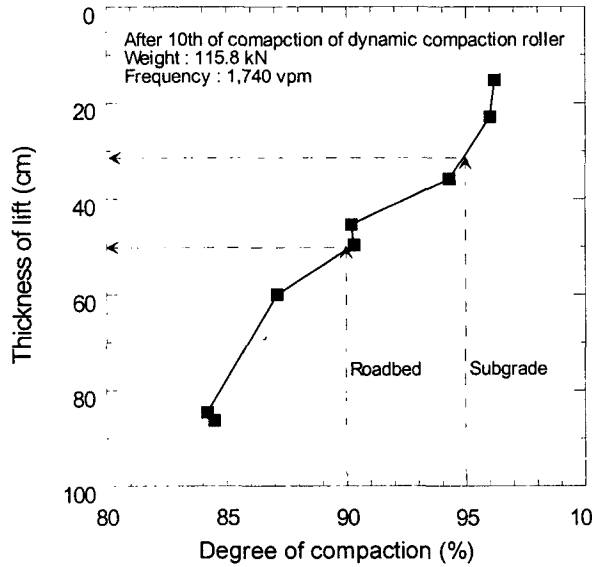


그림 6 다짐도 변화

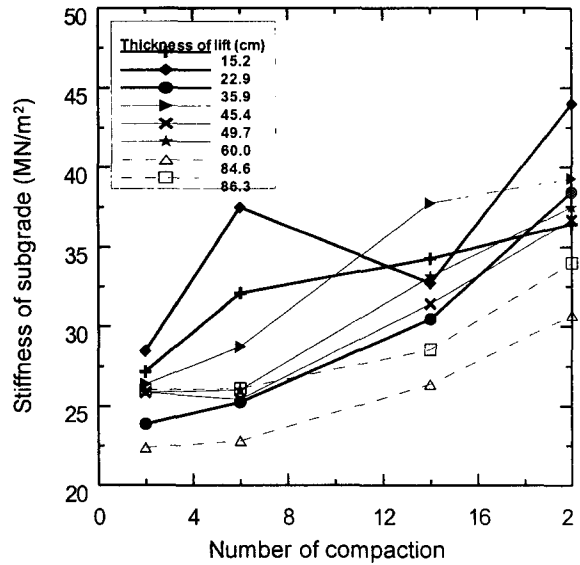


그림 7 성토체의 탄성계수

3. 수치해석

일반적인 동적 재하 공법시 다짐에너지는 곧바로 지반에 전달되어 지반의 변형을 발생시키는 변형에너지로 변화하게 된다. 이때 지반에 발생하는 응력이 지반이 가지는 허용치를 넘어설 경우 소성변형이 발생하면서 에너지가 소산되게 된다. 지반의 경우 소성변위가 발생하면 단위체적당 중량이 증가하게 되는데 이것을 바로 다짐이라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대형진동 다짐롤러의 진동하중이 성토 대상지반의 다짐에 미치는 영향을 파악하기 위해서, 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 소산에너지를 하중재하면으로부터의 깊이와 수평 이격거리에 대해서 분석하였다.

3.1 해석조건

진동롤러에 의해서 다짐이 이루어지는 성토지반을 모델링하기 위해서 하중재하지점의 도심을 중심으로 대칭구조로 되어있는 2차원 평면변형을 요소를 사용하였고, 해석지반은 탄소성거동을 하는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 또한, 최대응력이 발생한 이후 토압을 쉽게 고찰하기 위하여 시간영역에서 수행하였다. 해석방법으로는 묵시적 방법인 Newmark - β 방법과 최종 가속도의 값을 이전 시간단계에서의 다른 응답의 함수로 나타내어 해석하는 명시적 방법을 혼합한 직접적분법을 사용하도록 하여 안정적인 해석을 수행하였다. 또한, 경계조건은 해석단면의 하부는 연직 방향으로 응력과 변형률이 전혀 발생하지 않는 것으로 가정하고, 측면부는 수평방향으로 응력과 변형률을 구속하는 경계조건을 설정하였다. 해석단면의 경계부에서 충격하중에 의한 파의 영향을 줄이기 위해서 단면의 크기를 수평·수직방향으로 20m 로 확장하여 해석하였다. 수치해석에 사용한 재료의 물성은 표 1과 같이 문헌(Das, B. M, 1994)과 현장시험을 참조하여 사용하였다. 이때, 다짐이 되지 않은 성토체의 물성은 상대적으로 느슨한 사질토의 상태로 가정하여, 원지반을 기준으로 하였을 때, 단위중량은 80%, 탄성계수는 30% 인 값을 사

용하였고, 원지반은 조밀한 사질토로 가정하였다. 또한, 해석의 간편성을 위해서 단면을 구성하는 재료는 모두 균질, 등방인 매질로 가정하였다.

표 1 해석에 사용된 물성

구분	단위중량 (kN/m ³)	탄성계수 (MN/m ²)	포아송비	내부마찰각 (°)	점착력 (kN/m ²)
성토체	16.8	20	0.4	25	9.81
원지반	21.0	70	0.3	35	9.81
압반	24.0	300	0.3	35	49.1

현장시험에서 사용한 진동롤러가 1회 통과하였을 때의 하중을 그림 8과 같이 모사 하여 사용하였다. 진동롤러의 기진력은 Sine 파로 가정하고, 철륵의 자중은 삼각형쇄기파로 가정하였다. 하중의 크기는 철륵의 자중과 기진력을 철륵과 성토면의 접촉면적($B \times L = 0.2\text{m} \times 2.1\text{m}$)으로 나눈 응력값을 사용하였고, 재하시간은 진동롤러가 철륵과 성토면의 접촉면을 통과하는 시간으로 설정하였다. 이때, 발생하는 최대하중은 철륵의 자중에 의해서 발생하는 압력 150kN/m^2 ($\approx 60\text{kN}/2.1\text{m}/0.2\text{m}$)과 기진력의 압력 490kN/m^2 ($\approx 235\text{kN}/2.1\text{m}/0.2\text{m}$)을 합한 640kN/m^2 (총하중 $270\text{kN} \approx 30\text{ton}$)이고, 주파수는 25Hz ($\approx 1740\text{rpm}/60$), 하중 재하시간은 0.2초 ($\approx 0.2\text{m}/(7.7\text{km/hr}/2)$)이다.

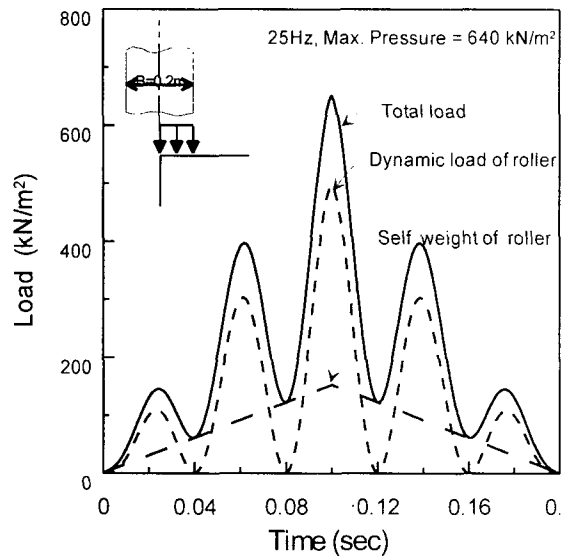


그림 8 해석에 사용된 하중 형상

3.2 해석결과

그림 9는 진동하중에 의해서 성토체에서 발생한 소산에너지 중 일례를 나타낸 것이다. 하중이 재하된 성토면에서 깊이(D_p)가 10cm 인 경우를 살펴보면, 하중재하지점에서의 수평방향으로 이격된 거리(D_s)가 1cm 로 하중재하지점의 도심에서 가장 가까운 곳에 위치한 지점에서의 경우, 소산에너지는 진동하중이 재하됨에 따라서 급격히 증가하여, 하중재하 완료시에 최대값을 나타내었다. 이때 단위 부피당 최대소산에너지는 13.1kJ/m^3 이다. 또한, 이격거리가 9cm 로 하중재하지점의 가장 바깥쪽 지점에서의 최대소산에너지는 70.1kJ/m^3 으로 10cm 깊이에서는 하중재하지점의 도심보다 바깥쪽 지점에서 상대적으로 큰 소산에너지가 발생하는 것을 알 수 있다. 깊이가 20cm 인 경우를 살펴보면, 이격거리가 1cm 인 경우, 최대소산에너지가 75.0kJ/m^3 으로 깊이가 10cm 인 지점보다 400% 정도 큰 값이 나타났고, 이격거리가 9cm 인 경우에는 54.6kJ/m^3 으로 깊이가 10cm 인 지점보다 20% 정도 작게 나타났다.

진동하중에 의해서 발생하는 소산에너지의 변화를 자세히 살펴보기 위해서, 하중재하지점으로부터 이격거리와 깊이에 따른 소산에너지의 변화를 그림 10에 나타내었다. 그림 10으로부터 깊이가 10cm 인 경우, 이격거리가 $1 \sim 9\text{cm}$ 인 구간에서는 이격거리가 증가함에 따라서 소산에너지가 급격히 증가하여, 이격거리가 9cm 인 곳에서 최대소산에너지가 발생하며, 이격거리가 9cm 이상인 경우 점차 감소하여 30cm 이상에서는 소산에너지가 거의 발생하지 않는다. 깊이가 20cm 에서 40cm 인 경우, 하중재하지점의 도심에서 최대소산에너지가 발생한 후 급격히 감소하였다. 깊이가 50cm 이상인 경우, 소산에너지가 10kJ/m^3 이하로 나타난다.

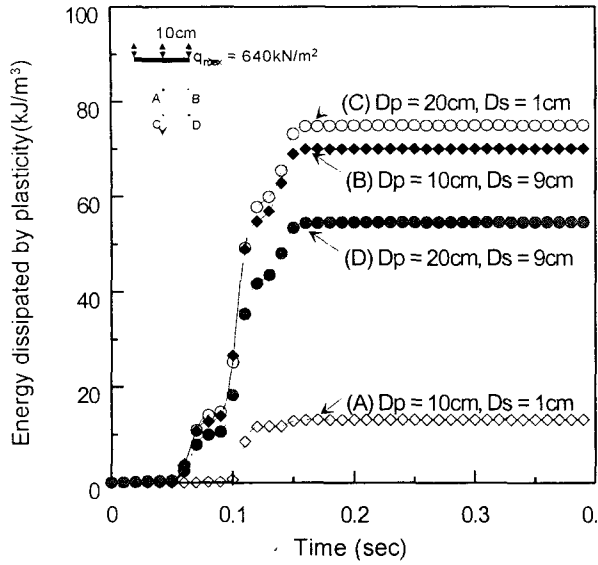


그림 9 시간에 따른 소산에너지의 변화

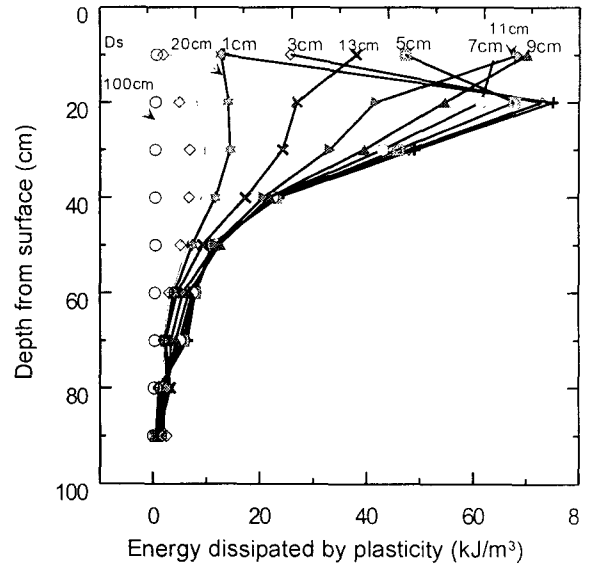


그림 10 깊이에 따른 소산에너지의 변화

그림 11은 하중재하지점으로부터의 깊이와 이격거리에 따른 소산에너지의 분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 살펴보면, 하중재하지점에서 깊이가 깊어질수록, 이격거리가 커질수록 소산에너지가 작아지는 경향을 나타내고 있다. 그러나, 하중재하구간의 바로 아래 20cm까지는 깊이가 깊어질수록 소산에너지가 증가하여, 최대소산에너지는 하중재하지점의 도심아래 20cm깊이에서 발생하고, 이때 최대소산에너지는 75kJ/m^3 이다. 이와 같은 소산에너지의 분포로부터 진동롤러를 1회 통과시킨 진동하중에 의한 소산에너지는 하중재하지점의 도심으로부터 수평이격거리와 깊이 80cm까지 다짐에너지가 전달된다고 볼 수 있으며, 그 이상의 깊이에서는 다짐이 거의 이루어지지 않는다고 볼 수 있다. 그러나, 성토두께가 40cm 이상인 지점에서는 다짐에너지가 급격히 감소하므로, 효율적인 다짐을 실시하기 위해서는 성토두께가 40cm를 넘지 않는 것이 바람직하다고 판단된다.

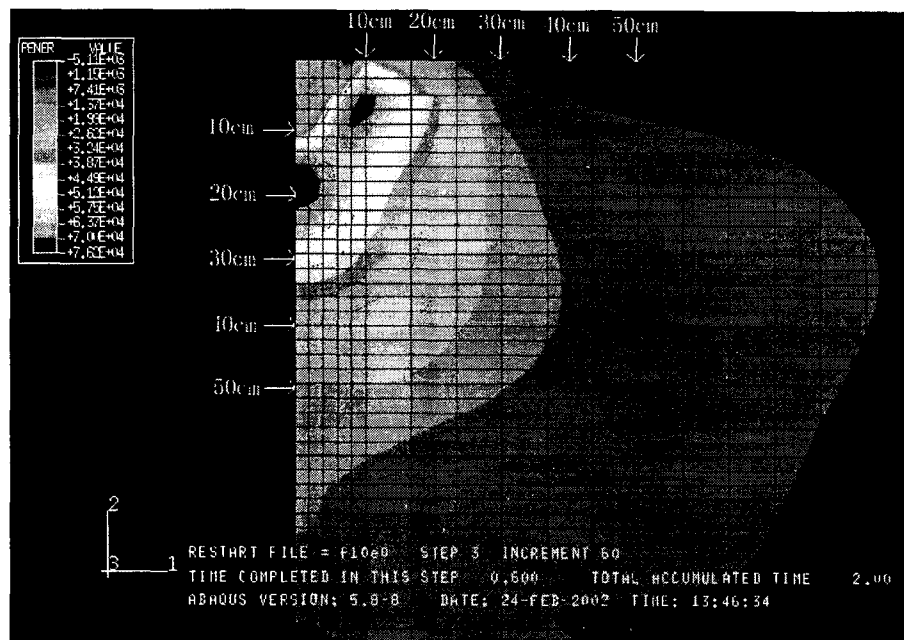


그림 11 소산에너지의 분포

4. 결론

대형진동롤러에 의한 다짐 시 성토두께의 영향을 평가하기 위하여 실시한 현장 시험 및 동적 유한요소해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 성토두께와 다짐도의 관계로부터 노상 품질관리기준은 성토두께 30cm까지, 노체는 성토두께 50cm까지 만족하여 경제적인 시공을 위해 성토두께 증가를 고려 할 수 있는 것으로 나타났으나, 지반지력 계수는 분산이 매우 크며 단지 20cm 성토두께에서 만이 시멘트 콘크리트 포장의 노체기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서, 성토두께의 증가를 위해서는 현행 다짐관리기법의 정확성에 대한 평가와 함께 적절한 현장관리 기준의 정립이 필요한 것으로 판단된다.
- 2) 현장 계측결과 성토두께의 하부지점에서 측정한 동적토압의 최대값은 전체적으로 볼 때 성토두께가 클수록 감소하고 있으며, 초기 다짐에는 최대 동적토압 값이 증가하고 있으며, 다짐회수의 증가에 따라 위치별로 일정 값에 수렴하는 경향을 보이고 있다. 이는 일정 다짐회수 이상에서는 다짐회수의 증가에 따른 다짐효과에 미치는 영향이 작아지는 것을 의미하는 것으로 판단된다.
- 3) 진동롤러의 1회 통과시 발생하는 진동하중에 대해서 성토체의 소산에너지를 유한요소해석을 실시하여 살펴보았다. 소성에 의한 소산에너지는 하중재하부 20cm 깊이까지는 깊이가 증가함에 따라서 급격하게 증가하여 최대값이 나타나고, 그 이하의 깊이에서는 감소하여 80cm의 깊이까지 소산에너지가 발생한다. 그러므로, 80cm 깊이까지 다짐이 이루어지는 것을 알 수 있다. 그러나, 40cm이하의 깊이에서는 소산에너지가 급격히 감소하므로, 효율적인 다짐을 실시하기 위해서는 성토두께를 40cm이하로 하거나 다짐회수를 증가시켜야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 한국도로공사(1998), "고속도로 전문시방서(토목편)", pp. 4-14~4-29, pp.9-1~9.9.
2. D'Appolonia, D. J., Whitman, R.V., and D'Appolonia, E.(1970), "Sand compaction with Vibratory Rollers", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM1, pp.49-72.
3. Das, B.M.(1994), Principles of Geotechnical Engineering, PWS Publishing Company, Boston
4. Dobry, R., and Petrakis, E.(1984), "Sand Compaction in Cyclic Shear on A Statistical Model", Engineering Mechanics in Civil Engineering, A.P. Boreisi, et al, eds., pp. 1245-1248.
5. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.(1997), *ABAQUS Theory Manual*.
6. Holtz, R. D., and Kovacs, W.D.(1981), An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
7. Lenke, L. R., Grush, M., and McKeen, R.G(1999), "Evaluation of the Humbolt GeoGauge™ on Dry Cohesionless Silica Sand in a Cubical Test Bin", ATR Institute, University of New Mexico.