

차량충돌에 대한 보강토 옹벽 안전성 확보를 위한 가드레일 설치거리

박 권·홍기남^{*†}·안광국^{*}

화신엔지니어링 · ^{*}충북대학교 토목공학과
(2009. 8. 11. 접수 / 2009. 10. 13. 채택)

Establishment of Guardrail Distance for Safety of Reinforced Earth Retaining Wall by Vehicle Collision

Kwon Park · Ki Nam Hong^{*†} · Kwang Kuk Ahn^{*}

Hwahshin Engineering

^{*}Department of Civil Engineering, Chungbuk National University
(Received August 11, 2009 / Accepted October 24, 2009)

Abstract : In this study, the numerical analyses regarding the distance between the guardrail and the reinforced earth wall as parameter were performed to determine the safe distance of guardrail installed on reinforced earth wall from the reinforced earth wall. The analyses were fulfilled by increasing the distance between the guardrail and reinforced earth wall from 150mm to 750mm. The computer program used in this research is LS-DYNA, which is very popular in analysis of vehicle collision. Ford single unit truck in NCAC was employed as the model of vehicle and the velocity of vehicle collision was 80km/hr. As a results of analyses, the safety of guardrail was secured regardless of the distance between the guardrail and block of reinforced earth wall. However, to secure the safety of block of reinforced earth wall the distance between the guardrail and block of reinforced earth wall should be over 600mm.

Key Words : guardrail, reinforced earth wall, LS-DYNA, vehicle collision, numerical analyses

1. 서론

경제성장과 인구의 증가로 인하여 우리나라의 도로 및 교통량은 급격히 증가하고 있고, 차량의 대형화, 중량화, 고속화로 인하여 도로교통사고 발생률의 둔화에도 불구하고 교통사고 한건당의 인명, 재산 피해가 증가되고 있어 경제, 사회적으로 큰 문제가 되고 있다^{1,2)}. 이런 도로의 사고를 줄이기 위하여 설치된 도로안전시설은 운전자의 안전과 교통의 원활한 소통을 도모하고 도로 구조물의 보존을 위해 설치하는 시설로서 시선유도시설, 조명시설과 같이 도로의 시인성을 높이는 시설과 방호울타리, 충격흡수시설과 같이 차량이 길 밖으로 이탈 및 추락하거나 장애물과 충돌하는 것을 방지할 목적으로 설치하는 차량방호 안전시설 등으로 나누어진다. 차량방호 안전시설은 줄음과 미끄럼 등에 의해 도로를 벗어나 위험에 직면한 차량을 최대한 안

전하게 유도할 목적으로 설치되는 시설로서 국내도로의 대표적인 노측용 차량방호 안전시설은 철재 가드레일이다. 가드레일은 주행 중 진행방향을 잘못 잡은 차량이 길 밖 또는 보도 등으로 이탈하는 것을 방지하여 탑승자, 차량, 보행자 또는 도로변의 주요 시설을 안전하게 보호하기 위하여 설치하는 시설이다. 고속도로에 널리 쓰이고 있는 가드레일은 노측용 방호울타리로서의 대표적인 역할을 지금까지 충실하게 이행하여 왔다³⁻⁵⁾.

최근 보강토 옹벽이 시공이 간편하고 경제성이 높아 철근 콘크리트 옹벽을 대신하여 많이 시공되고 있다. 보강토 옹벽은 콘크리트 옹벽과는 다르게 각 블록이 서로 일체로 거동하지 않기 때문에 차량과의 충돌이 발생하는 경우 옹벽이 붕괴될 가능성을 내포하고 있다⁶⁾. 또한, 난간 충돌 사고의 경우 도로교 부대시설과의 충분한 안전거리를 확보하지 못할 경우 보강토 옹벽 등과 같은 부대시설의 파손에 의한 2차 사고의 발생 확률이 매우 높을 것으로 예상된다. 이러한 부대시설 등의 파괴는 인명 및 재산피해를 확대시키기 때문에 추가적인 사고

[†] To whom correspondence should be addressed.
hong@chungbuk.ac.kr

발생을 미연에 방지하고 도로 부대시설의 안정성을 확보하기 위한 다양한 연구가 활발히 진행되어야 할 필요가 있다. 그러나 기존의 연구는 대부분이 가드레일 자체의 안전성에만 주안점을 두고 있을 뿐이며, 가드레일 충돌시 매입 지주와 보강토 옹벽 등과 같은 부대시설의 안전성을 동시에 다룬 연구는 거의 없는 실정이다^{7,8)}. 따라서, 본 연구에서는 보강토 옹벽의 안정성을 확보할 수 있는 방안을 마련하기 위하여 지주와 보강토 옹벽사이의 거리에 변화를 주어 최적의 이격거리를 찾기 위한 해석적 연구를 수행하였다.

2. 충돌이론

도로 시설물의 충격완화는 물리적 개념으로 힘과 일 그리고 에너지의 상호 전환을 기초로 하고 있다. 즉 물리학적 이론으로 운동량 보존의 법칙과 운동에너지 불변의 법칙에 근거하고 있다.

첫째 : 차량과 가드레일의 충돌 직전의 에너지 상태로서 차량의 충돌직전 속도를 V , 차량의 질량을 m , 가드레일이 받는 힘을 F , 이때의 변형량을 Δd 라 할 때 이 때의 에너지상태는 다음 식 (1)과 같이

$$E_{system} = E_{vehicle} + E_{guardrail} = \frac{1}{2}mV^2 + \sum_{d=0}^{d=D} F\Delta d \quad (1)$$

나타낼 수 있으며, F 와 Δd 는 0이므로 전체의 에너지 상태는 차량의 운동에너지만 존재하며 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{system} = E_{vehicle} = \frac{1}{2}mV^2 \quad (2)$$

둘째 : 차량과 가드레일의 충돌상태로 이때는 차량과 가드레일이 접촉하고 있는 상황으로 상호간에 에너지의 전달이 일어나고 있다. 전체 에너지를 나타내면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{system} = E_{crash-vehicle} + E_{crash-guardrail} = \frac{1}{2}mV_{crash}^2 + F_{crash} \Delta d_{crash} \quad (3)$$

여기서,

- V_{crash} : 충돌 중 변화된 차량의 속도
- F_{crash} : 충돌 중 가드레일이 받는 힘
- Δd_{crash} : 충돌 중 가드레일의 변형

셋째 : 충돌 후의 에너지상태로 이때는 차량과 가드레일이 분리된 상태로 각각이 갖고 있는 에너지를 합한 것이며 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{system} = E_{crash-vehicle} + E_{post-guardrail} = \frac{1}{2}mV_{post-crash}^2 + F_{post-crash} \Delta d_{post-crash} \quad (4)$$

여기서,

- $E_{crash-vehicle}$: 충돌 후 차량의 에너지
- $E_{post-guardrail}$: 충돌 후 가드레일이 받는 에너지
- $V_{post-crash}$: 충돌 후 변화된 차량의 속도
- $F_{post-crash}$: 충돌 과정에서 가드레일이 받는 힘
- $\Delta d_{post-crash}$: 충돌 후 가드레일의 변형

차량의 운동에너지가 가드레일의 변형에너지로 전환된 에너지는 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta E_{transit} &= E_{vehicle} - E_{post-vehicle} \\ &= \frac{1}{2}mV^2 - \frac{1}{2}mV_{post-crash}^2 \\ &= E_{post-guardrail} \\ &= F_{crash} \Delta d_{post-crash} \end{aligned} \quad (5)$$

즉, 충돌전에 차량이 갖고 있던 운동에너지에서 충돌 후 차량이 갖고 있는 운동에너지를 뺀 것으로 이것은 에너지보존의 법칙에 의하여 충돌로 변형된 가드레일의 변형에너지와 같게 된다.

3. 해석모델

3.1. 차량모델

본 연구에서는 충돌해석 분야의 광범위한 적용 등을 통해 정확성이 입증된 프로그램이며, 특히 가드레일과 차량 부재 모델링에 용이한 요소들을 가지고 있는 LS-DYNA을 사용하였다. 차량모델로는 미국의 차량 충돌 연구 센터인 NCAC(National Crash Analysis Center)⁹⁾의 13개의 차량 모델 중 8톤 Ford Single Unit Truck 모델을 선정하였으며, 이를 범용 구조 해석프로그램인 LS-DYNA에 적용하였다. NCAC는 차량 충돌 시뮬레이션을 위해 실제 차량을 세부적으로 모델링하고 인터넷 홈페이지를 통해 무료로 차량 모델을 제공하고 있다. 트럭의 몸체는 19,479개의 쉘 요소로 되어 있으며, 내부 부품은 1,248개의 솔리드 요소로 되어 있다. 대부분의 물성치는 항복응력 270MPa, 탄성계수 205,000MPa인 강재로 되

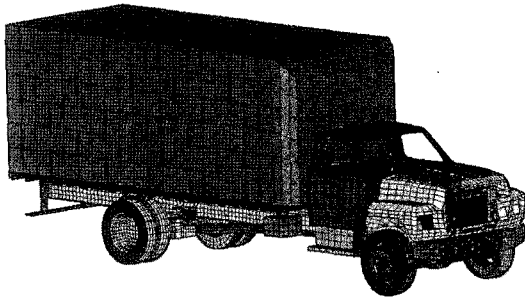


Fig. 1. Truck model.

어 있다. Fig. 1에 3차원 차량 모델을 나타내었으며, 충돌시 차량의 속도는 80km/h로 하였다.

3.2. 가드레일 모델

해석모델에 적용한 가드레일은 가장 일반적으로 사용되는 SB3 등급의 가드레일을 사용하여 해석 상에서 최악의 상황을 고려하고 실제 상황에서 최대의 안전을 확보할 수 있도록 하였다. 보강토 옹벽의 충돌해석을 위해서는 가드레일의 정확한 해석이 선행되어야 한다. 가드레일의 정확한 성능 평가를 위해서는 가드레일을 실물과 유사하게 모델링하여야 한다. 그러기 위해서는 실제 가드레일 도면과 동일한 치수와 두께를 시뮬레이션에 적용시켜야 한다. 현재 일반 국도와 보강토 옹벽 설치 구간에 많이 적용되는 가드레일은 SB3등급 가드레일이다. 가드레일은 지주와 레일, 연결 볼트와 너트로 구성되어 있으며 가드레일 지주의 길이는 2200mm이고 지주부분의 1500mm를 직접 지반에 매입하여 상부 700mm 정도만이 노출된다.

가드레일의 유한 요소 모델은 지주와 레일로 분리하여 모델링하였으며, 연결 볼트를 LS-DYNA에서 제공하는 용접기능 요소인 Spotweld를 적용하여 지주와 레일을 부착시켰다. 지주의 형상은 원형 지주로 모델링하였고, 두께는 4mm를 적용시켰다. 레일의 경우는 W형의 레일에 두께를 4mm를 적용



Fig. 2. Gaurdrait 3D model.

하였다. 모델링 요소는 지주와 레일 모두 쉘 요소를 사용하였으며 강재의 재료 특성을 고려하기 위하여 LS-DYNA에서 제공하는 재료모델 중 Piecewise_linear_plasticity를 사용하였다. 사용재료의 물리적 성질은 항복강도 400MPa, 포아슨비 0.3, 탄성계수 210,000MPa을 적용하였다. Fig. 2는 3차원 가드레일 해석모델을 보여주고 있다.

3.3. 옹벽 모델

보강토 옹벽은 현재 일반적으로 널리 사용되고 있는 블록형 옹벽으로 모델링 하였다. 보강토 옹벽 유한요소모델은 블록과 블록 사이에 LS-DYNA에서 제공하는 접촉 요소 중 하나인 Automatic_Single_Surface를 사용하여 충격시 블록의 파괴 형상을 묘사할 수 있도록 하였다. 보강토 옹벽의 블록 크기는 가장 일반적으로 사용되고 있는 가로, 세로, 그리고 높이가 400mm × 400mm × 200mm인 슬리트 요소로 모델링 하였다. 블록의 재료모델은 완전 탄성체로 가정하여 블록의 파괴는 고려하지 않고 충돌에 의하여 옹벽이 무너지는 형상을 표현할 수 있도록 하였다. Fig. 3에 보강토 옹벽의 해석모델을 나타내었다.

3.4. 지반 및 보강재 모델

보강재는 LS-DYNA에서 제공하는 보 요소를 사용하여 모델링하였으며, 400mm간격으로 포설하였다. 또한 보강재는 보강토 옹벽의 블록과 뒷채움재와의 일체거동을 하기 위해서 Coincident 기능을 이용하여 일체화 하였다. 재료모델은 Piecewise_linear_plasticity를 적용하였다. 재료의 역학적 특성으로는 단위중량 0.1kN/m³, 포아슨비 0.25, 탄성계수 3,000MPa을 적용하였다. 지반은 여러 현상조건에 따라 변수의 범위가 너무 넓기 때문에 일반적으로 보강토 옹벽에 시공되는 지반을 대상으로 모델링을 수행하였다. 본 논문에서 사용된 지반은 사질토로 하였고, 8절점 솔리드 요소를 사용하여 모

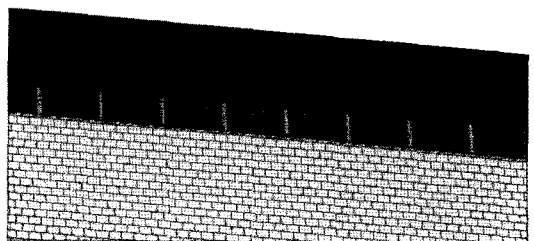


Fig. 3. Reinforced earth retaining wall model.

델링하였다. 지반의 재료모델은 LS-DYNA에서 제공하는 147번 재료모델을 사용하였으며, 모델의 파라미터 값은 미국연방 고속도로 관리국(FHWA)에서 제안한 값을 사용하였다¹⁰⁾.

4. 충돌해석 및 결과

4.1. 해석변수

보강토 옹벽의 거동을 해석적으로 평가하기 위해 차량과 가드레일, 보강토 옹벽에 대한 충돌해석을 수행하였다. 가드레일과 지반, 차량, 보강토 옹벽은 모두 동일한 조건으로 적용하였으며, 가드레일 지주와 보강토 옹벽 사이의 이격거리를 변화시켜 해석을 실시하였다. Fig. 4에서 Dis.는 보강토 옹벽 블록과 가드레일 지주간의 이격거리를 의미하며, 거리를 150mm, 300mm, 450mm, 600mm, 750mm로 150mm씩 증가시키면서 해석을 수행하였다.

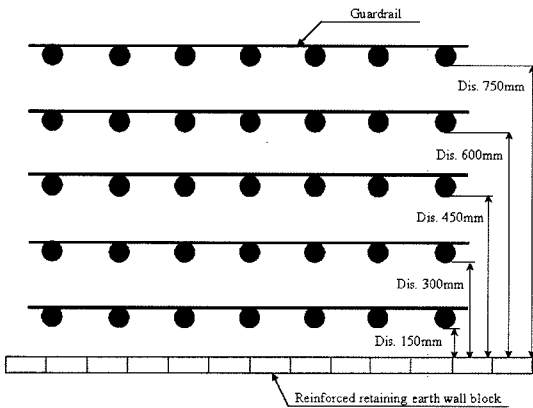


Fig. 4. Analysis variable.

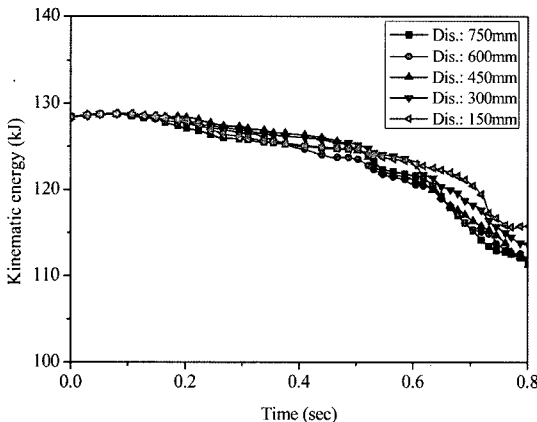


Fig. 5. Energy curves according to guardrail distance.

4.2. 충돌에너지

LS-DYNA을 이용한 보강토 옹벽의 차량충돌 해석이 정확하게 진행되었는지를 확인하기 위하여 에너지를 검토하였다. Fig. 5는 해석시간에 따른 차량의 에너지 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 5를 통해서 충격 초기 차량의 운동에너지가 모두 128kJ에 수렴함을 확인할 수 있다. 초기 가드레일에 가해지는 충돌에너지가 모두 차량의 에너지에 의해 발생한다고 가정하였을 경우 식 (2)로부터 구한 130kJ과 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다. 또한 가드레일과 보강토 옹벽간의 거리변화에 따른 운동에너지 변화의 폭이 크게 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 가드레일과 보강토 옹벽간의 거리가 150mm로 가장 작은 경우 차량의 운동에너지가 충돌이후 가드레일이 차량의 운동에너지를 충분히 흡수해 주지 못하여 0.7초 이후 운동에너지가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

전체 에너지에 대한 분포를 살펴보면 가장 안전한 상태일 때의 이격거리 750mm에 대하여 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 6의 그래프에서 알 수 있듯이 운동에너지는 시간에 따라 점차 감소함을 볼 수 있으며 내부에너지의 경우 줄어든 운동에너지 만큼 증가함을 확인할 수 있다. 이론적으로는 운동에너지와 내부에너지의 합이 전체 시간에 걸쳐 일정하게 유지되어야 하지만 해석 결과를 확인해 보면 점차 전체 에너지가 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 이것은 초기 차량의 운동 에너지가 충돌후 가드레일과 접촉을 하는 과정에서 마찰이 발생하여, 열에너지의 형태로 변환되는 부분이 생기기 때문이며, 또한 마찰에 의하여 차량의 속도

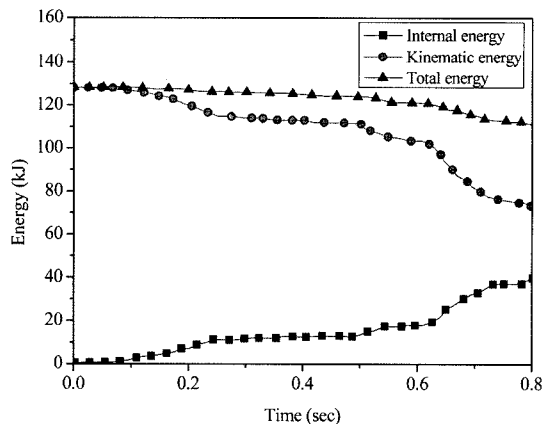


Fig. 6. Total energy(Dis. 750mm).

가 줄어들고 그에 따라 차량 자체의 운동 에너지도 감소하기 때문임을 알 수 있다.

4.3. 가드레일 및 옹벽의 변위

보강토 옹벽과 가드레일의 이격거리가 150mm와 750mm일 때의 해석결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다. Fig. 7은 보강토 옹벽과 가드레일의 이격거리가 150mm로 가장 작은 경우 차량이 충돌하면서 가드레일이 보강토 옹벽 블록을 전면으로 치면서 보강토 옹벽 블록이 전면으로 1049mm 튀어나가 옹벽이 붕괴되는 거동을 보이고 있다. 반면 보강토 옹벽과 가드레일의 이격거리가 750mm로 가장 큰 경우 차량 충돌이후에도 보강토 옹벽 블록의 변위가 크게 발생하지 않고 안전성을 충분히 확보할 수 있다는 것을 Fig. 8은 보이고 있다.

Fig. 9에는 보강토 옹벽과 가드레일의 이격거리가 150mm에서 750mm까지 150mm씩 증가할때의 가드레일의 보강토 옹벽 전면방향의 최대변위를 나타내었다. 이격거리 150mm에서 907.8mm로 가장 큰 변위가 발생하였으며, 이격거리 300mm까지 급격하게 가드레일의 변위가 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히, 이격거리 300mm에서 750mm까지 가드레일의 변위가 완만하게 변화하는 경향을 나타내고 있다. 도로시설물 관리 시방서에서는 가드레일의 최대변위량을 1100mm로 규정하고 있으며, 해석결과에서는 이격거리에 관계없이 가드레일의 변위가 허용변위 이내에서 발생하는 것으로 나타났다.

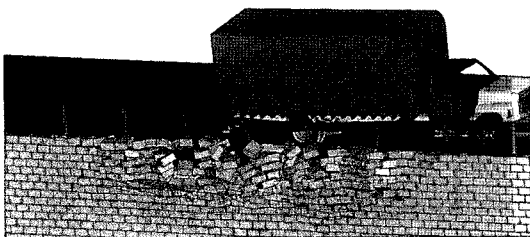


Fig. 7. Result of collision analysis(Dis. 150mm).

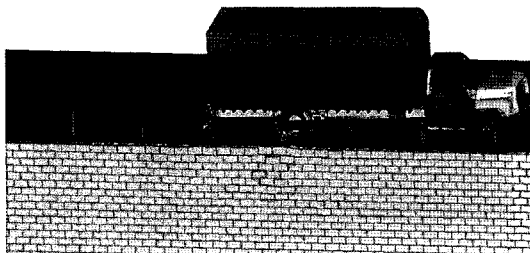


Fig. 8. Result of collision analysis(Dis. 750mm).

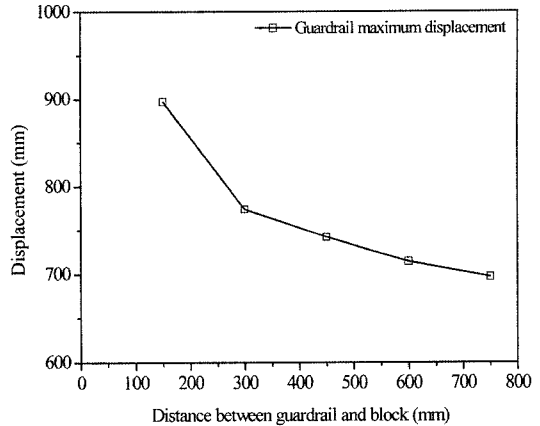


Fig. 9. Guardrail Maximum displacement.

Fig. 10에는 해석시간동안 보강토 옹벽 블록의 최대변위를 이격거리별로 나타내었다. 해석시간 0.2초까지는 거의 모든 이격거리에서 보강토 블록의 변위가 발생하지 않고 있다가 그 이후부터 급격하게 증가하는 거동을 보여주고 있다. 가드레일과 보강토 블록과의 거리가 450mm까지는 보강토 블록이 최대변위가 400mm 이상으로 블록이 차량충돌 과정에서 탈락할 가능성이 매우 큰 것으로 나타났다. 반면 가드레일과 보강토 블록의 이격거리가 600mm 이상이 되면서 보강토 블록의 변위가 100mm 이내로 발생하였으며, 이는 보강토 옹벽 블록 폭의 25%내로 블록이 이탈하지 않고 안전성을 확보함을 Fig. 10을 통해서 확인할 수 있다. Fig. 11에는 각 이격거리에서 보강토 옹벽의 최대변위값만을 나타내었다. Fig. 11은 앞에서 언급한 바와 같이 보강토 블록과 가드레일간의 설치거리가 600mm 이상이 되면서 보강토 옹벽 블록의 변위량이 급격하게 감

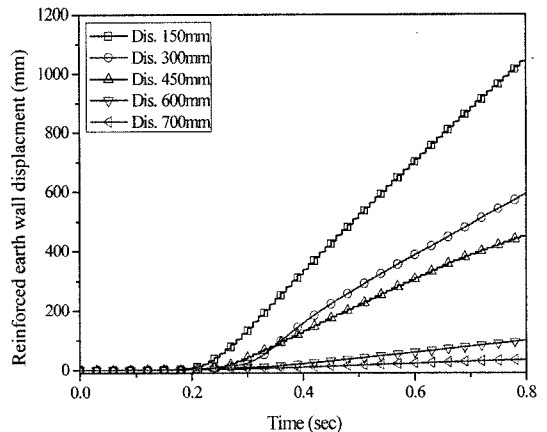


Fig. 10. Block displacement according to guardrail distance.

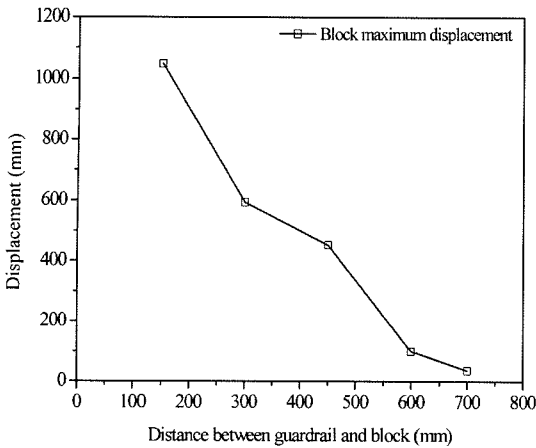


Fig. 11. Block Maximum displacement.

소함을 확인할 수 있다. 따라서 가드레일 충돌에 의한 보강토 옹벽의 안전성을 확보하기 위해서는 최소한 이격거리를 600mm 이상 확보해야함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 차량의 충돌에 의한 보강토 옹벽의 안전성 확보를 위한 이격거리 설정한 관한 해석적 연구를 수행하였다. 해석적 연구를 통해서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 가드레일과 보강토 옹벽의 이격 거리를 150mm에서 750mm로 변화시켰을 때 가드레일의 최대 변위는 907.8mm로 나타났다. 이 값은 국토해양부에서 제안하는 1100mm 이내로 모든 경우 가드레일의 안전성이 확보되는 것으로 나타났다.
- 2) 가드레일과 보강토 옹벽의 이격 거리 150mm에서는 보강토 옹벽의 변위량이 1048.96mm로 나타나 블록이 옹벽에서 완전히 이탈됨을 확인할 수 있었다.

3) 보강토 옹벽의 변위는 이격거리 600mm일 경우 99.80mm로 보강토 옹벽 블록 폭의 25%내의 변위를 발생시켜 블록이 이탈하는 것을 방지하였다.

4) 해석 결과를 통하여 보강토 옹벽 및 가드레일에 대한 안정성을 모두 확보하기 위해서는 최소 600mm 이상의 이격거리가 필요함을 확인할 수 있었다.

감사의 글 : 이 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2008).

참고문헌

- 1) 유경수, “충격완화 가드레일 개발 연구”, 한국 도로공사 도로연구소 보고서, 1996.
- 2) 도로안전시설 설치 및 관리지침 통합편, 건설교통부, 2002.
- 3) 박중호, “가드레일 지주의 횡방향 충격력에 대한 거동 연구”, 공주대학교 석사학위논문, 2003.
- 4) 김현주, “지방부도로의 도로안전시설(가드레일) 설치방안”, 한남대학교 석사학위논문, 2004.
- 5) 강준욱, “충돌하중에 의한 콘크리트 방호울타리와 교량바닥판의 거동에 관한 실험적 연구”, 영남대학교 석사학위논문, 2005.
- 6) 이환진, “벽체강성에 따른 보강토 옹벽의 거동”, 충북대학교 석사학위논문, 2007.
- 7) 정봉조, “가드레일 지주 근입깊이에 관한 연구”, 한국 도로공사 도로교통기술원 보고서, 2007.
- 8) 조판규, “차량 충돌에 의한 복합소재 가드레일의 거동 연구”, 세종대학교 석사학위논문, 2008.
- 9) <http://www.ncac.gwu.edu/>
- 10) FHWA-HRT-04-095, “Manual For LS-DYNA SOIL MATERIAL MODEL 147”, 2004.