

BARRIER VII 프로그램을 이용한 가아드레일의 설계평가 및 지침

Evaluation and Guideline for Design of Guardrail by BARRIER VII Program

우 광 성¹⁾, 조 승 현²⁾, 고 만 기³⁾, 김 우⁴⁾
K. S. Woo S. H. Cho M. G. Ko W. Kim

ABSTRACT

The nonlinear dynamic behaviors of guardrail established on the local or high way have been investigated using BARRIER VII program with respect to four design variables such as section type of beams and posts, impact angle, impact velocity and vehicle weight. Computer simulation programs are sophisticated analytical models for analyzing dynamic vehicle/barrier interactions and provide a relatively inexpensive alternative to full scale crash testing. This study has been focused on the structural adequacy, occupant risk, and vehicle trajectory. For this purpose, the maximum deflection and impact force have been calculated to design the clear zone and to analyze effect of impact attenuation. Also, the acceleration of vehicle and exit angle after collision have been computed to estimate the occupant risk. From this study, it is suggested that we should strengthen the design criteria of guradrail to prevent from disastrous traffic accidents.

1. 서 론

도로 안전구조물의 종류로는 안전방호책(guard rail), 중앙분리대, 교량난간, 충격흡수장치 등이 있으며 각 구조물마다 다양한 형태가 개발되어 있거나 개발중에 있다. 지금까지의 국내실정은 이러한 도로 안전구조물의 독자적인 설계보다는 외국의 설계형식을 모방하는 수준에 있다고 할 수 있으며 설계 시방서도 건설부 제정 도로교 표준시방서등 극히 일부가 있으며 설계항목도 설계하중(design load), 구조물의 높이 등 매우 제한적으로 규정되어 있는 실정으로 파악된다. 다른 일반 구조물과 달리 도로 안전구조물을 설계하는데 있어서는 각 구조물에 차량이 충돌했을 때 구조적 거동에 따른 적합성(adequacy)뿐만 아니라 충돌후 차량의 운동및 충돌차량과 탑승자간의 상호작용을 동시에 생각해야 한다는 것이 특이하다. 예를 들면, 각종 차량이 교량상에 설치되어 있는 교량난간을 넘어 추락하거나 고속도로 중앙분리대등을 넘어 반대 차선에서 진행되는 차량과의 충돌, 철제난간을 부수고 급경사를 이루는 성토단면에 전복되면서 발생하는 차량사고와 같은 대형사고를 미연에 방지할 수 있는 적합한 방호체계를 설계하기 위해서는 이들 도로 안전구조물에 대한 정확한 동력학적 구조해석을 하여 구조물의 저항능력및 차량궤적(vehicle trajectory)을 파악해야 할 것이다. 또한, 도로 안전구조물의 중요한 설계개념이 되고 있는 충격력(impact force)의 흡수능력이 파악되어야 한다. 이 연구를 수행하는 방법에는 실물충돌시험(full scale crash test)과 수치모형실험으로 나누어 볼 수 있다. 그러나, 실물충돌시험은 막대한 경제적인 재원이 있어야 가능하고 아울러 충돌시험을 위한 충돌시험장이 필수조건이 된다. 그러나, 우리 나라의 여건상 이 방법은

- 1) 전남대학교 토목공학과 조교수
- 2) 전남대학교 토목공학과 석사과정
- 3) 삼환엔지니어링 구조부 차장
- 4) 전남대학교 토목공학과 부교수

어렵기 때문에 수치모형실험(computer simulation)이 모색되었다.

본 연구에서는 충돌시의 차량속도, 충돌각도, 차량중량, 보와 지주의 단면형상을 설계변수(design variables)로 가정하여 이에 따른 동력학적 거동은 BARRIER VII 프로그램을 사용하여 분석하고자 하며 이를 통해 탑승자와 차량과의 상호작용을 정확히 이해하게 하고 현재 국내 시방서에 규정된 설계조건에 적합성을 검토해보고자 한다. 특히, 가아드레일의 최대 변위, 최대 충격력과 차량의 이탈속도 및 가속도등을 계산하여 탑승자의 안전에 적합한지를 규명하고 차후 도로 안전구조물의 설계 방향을 제시하고자 한다.

2. 방호책의 일반적사항

2.1 방호책의 기능과 종류

방호책은 주행중 진행 방향을 잘못 잡은 차량이 길 밖 또는 대향차선으로 이탈하는 것을 방지하는 동시에 탑승자의 상해 및 차량 파손을 최소한으로 줄이고, 차량을 정상 진행 방향으로 복원시키는 것을 주 목적으로 하며, 부수적으로는 운전자 시선을 유도하는 등의 목적을 갖추고 있는 시설을 말한다. 한편, 방호책의 종류는 구조적 측면과 설치위치에 따라 아래와 같이 분류해 볼 수 있다. 구조적 측면에서는 철틀 보(beam)형 방호책, 케이블형 방호책, 콘크리트 보형 방호책으로 분류해 볼 수 있으며 설치위치에 따라 노측용 방호책과 분리대형 방호책으로 나누어 볼 수 있다. 본 연구에서는 노측용 철틀 보형 방호책을 해석 모델로 선정하였다.

2.2 방호책의 설치 개념

(1) 규정에 의한 설계방법

설계방법 또는 설계하중을 시방서의 규정에 따라 방호책 설계를 독자적으로 하는 방법

(2) 표준화된 형식을 채택하는 방법

몇 개의 사용수준(service level)에 대하여 표준화된 방호책 형식 및 재료등을 규정하여 각각의 경우에 맞추어 채택하는 방법으로 국내에서는 1989년 건설부제정 도로안전시설 설치편람의 가아드레일 설치규정을 다음과 같이 제시하고 있다. 즉, “지주의 높이 60 cm, 최대지주간격 4 m, 설계하중 250 kg/m의 수평력이 상단부에 작용시킨 것, 차량(3.5 - 14 ton)이 60 km/h, 15° 로 충돌했을 때 지주를 매입했을 때 방호책의 최대처짐이 1.1 m로 제한된다.” 일본의 도로교 시방서도 동일한 규정을 두고 있다. 미국의 AASHTO 도로교 시방서에는 각각 경우별로 세밀하게 규정되어 있으나 근본적으로 방호책의 기둥 높이는 68.6 cm 이상, 설계하중은 기둥 및 방호책보에 적각으로 10 kips (4.5 ton)을 사용하도록 되어 있다.

3. 프로그램 BARRIER VII

3.1 일반 및 적용범위

BARRIER VII은 1973년 U.C. Berkely의 Powell 교수팀에 의해 개발된 자동차 방호시설의 전산구조해석 프로그램으로 차량이 요성 방호책과 충돌하였을 때 2차원 평면에서 차량과 방호책간의 상호작용 및 동력학적 거동 즉 방호책의 최대변위, 충격력, 가속도, 이탈각도, 이탈속도 등을 분석할 수 있는 프로그램으로 현재 널리 사용되고 있는 이유는 실험실의 결과와 잘 일치한다는 것이 확인되었기 때문이다. 방호책의 거동은 비선형 거동(nonlinear behavior)을 하며 재료적 비선형에 대해서는 비탄성 해석(inelastic analysis)이 수행되며 대변형 이론(large deflection theory)에 기초를 둔 기하학적 비선형해석이 고려되어 실질적으로 비선형 동적해석(nonlinear dynamic analysis)이 고려되고 있다.

3.2 방호책모델(Barrier Model)

방호책은 비선형 거동을 규정하고, 하중이력(hysteresis)효과를 고려하였으며, 인장과(extensionally) 휨에(flexurally) 대해 양방선형(bilinear) 탄성-완전소성 항복을 가정하였다. 가아드

레일은 1차원 뼈대 구조물로 이상화하였으며, 가아드레일과 충돌하는 곳에 절점을 가정하여 자동차의 경계를 결정하고 자동차와 충돌할 접촉면을 설정하였다. 여기에 법선력과 접선력이 작용한다. 그리고 7개의 부재 유형을 사용할 수 있는데 축, 보(beam), 케이블(cables), 지주(posts), 기둥(columns), 용수철(springs), 쿨롱마찰 감쇄부재(Coulomb friction dampers), 점성 감쇄 부재(viscous dampers)이다. 본 연구에서는 보와 지주부재를 사용하였는데, 보부재는 일정한 단면적이고 전단변형을 무시하였다. 인장에 대해 보부재는 축방향력이 항복값을 넘었을 때 전길이에 걸쳐 항복이 발생한다고 가정하며, 휨에 대해 부재의 단부에 국부적인 소성현상이 발생하게 되면 항복한다고 가정한다.

3.3 차량 모델(Vehicle Model)

차량은 질량과 회전관성을 갖는 임의 형상의 2차원 강체(rigid body)로 이상화하며 강체 주위에 전방향으로 독립된 비탄성 스프링(inelastic spring)을 설치하여 방호책과의 충돌시 접촉점을 규정할 수 있게 하였다. 즉, 차량의 경계는 가아드레일과 접촉을 하게 될 몇 개의 절점으로 정의하였으며, 이 때 용수철은 질량이 없고 점성감쇄효과(viscous damping effect)가 없는 것으로 가정된다. 스프링계수는 실험에 의해 차종별로 얻어진다. 바퀴 위치는 해석시에 브레이크를 작동(on) 또는 미작동(off)함으로써 정의된다. 차량의 접촉점과 바퀴의 위치는 각각 자동차 진행방향(R방향) 자동차 진행의 직각방향(S방향) 좌표설정으로 그림 1과 같이 정의된다.

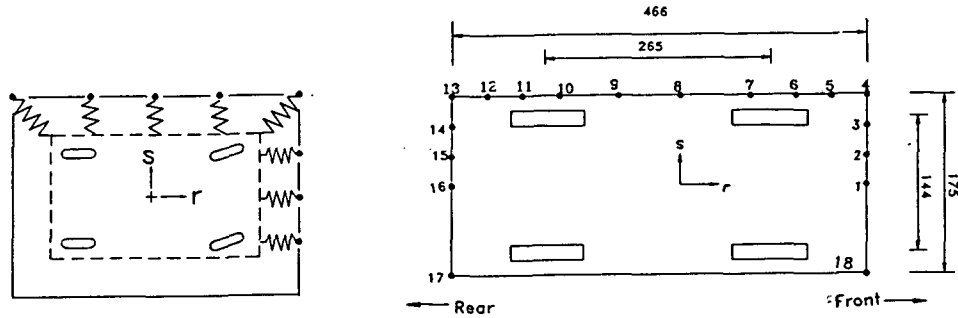


그림 1 차량 모델

3.4 지주모델(Post Model)

방호책에 사용되는 지주는 통상 지반에 매입되어 있으므로 매입된 지주는 지반과의 상호작용을 유발하게 된다. 지반의 수평반력계수를 단단한 점토(N=29)로 가정하여 그림 2와 같이 매입된 지반에서 발생하는 지반의 수평반력의 영향을 스프링 모델로 치환한 후 독립말뚝의 지지력과 횡방향력의 상관관계로 부터 지반의 수평반력계수 K_s 는 Vesic의 방정식으로 정의할 수 있다.

$$K_s B = 1.3 \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_p I_p}} \frac{E_s}{1-\mu^2} \quad (1)$$

여기서, $E_p I_p$ = 말뚝의 휨강성(flexural rigidity)

B = 말뚝의 직경

여기서, E_s 는 여러 가지 방법으로 얻을 수 있는데 본 연구에서는 Yoshida의 SPT Test[10]로 부터 다음과 같이 정의한다. 이 때의 평균오차는 실험치와 비교하여 $\pm 20\%$ 이다.

$$E_s = 6 N \quad (kg/cm^2) \quad (2)$$

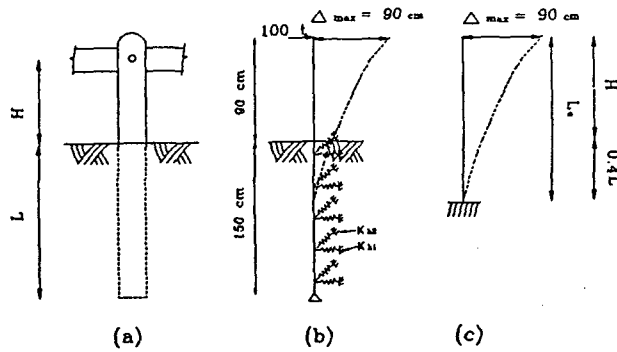
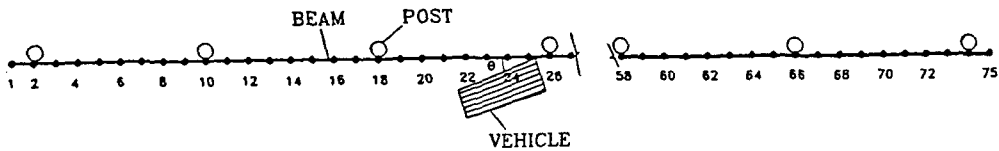


그림 2 지주의 스프링 모델

3.5 탑승자의 안전도 기준

1981년 3월 미국 교통연구원(TRB ; Transportation Research Board)은 국립합동 고속도로 연구 계획보고서 230(NCHRP ; National Cooperative Highway Research Program)을 통하여 방호시설을 포함한 고속도로 부속 시설물의 안전수행도 평가과정 추천안을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 탑승자의 안전도 평가를 위한 지침이 우선적으로 제시되어야 하겠으나 우리나라에서는 아직 이러한 지침이 세부적으로 확립되어 있지 않으므로 NCHRP 230을 참고하였으며 탑승자의 위험도 상한치를 결정하였다.



단면 형상	E (t/cm ²)	I (cm ⁴)	σ_y (t/cm ²)	A (cm ²)	W (kg)
파형	2100	50	2.5	13.2	10.37
단일 박스	2100	61.55	2.5	11.8	9.27
이중 박스	2100	59.84	2.5	13.44	10.56

그림 3 방호책의 유한요소 모델

4. 전산구조해석 결과

4.1 모델링 및 입력데이터

그림 3과 같이 보부재는 74개의 전단변형이 고려되지 않은 보요소를 50 cm 등간격으로 분할하여 모델링 하였으며, 강종은 SWS 41($\sigma_y = 2500 \text{ kg/cm}^2$)를 사용하여 해석하였다. 지주는 그림 2와 같이 땅속에 매입되어 지주와 지반의 상호작용이 발생될 수 있도록 3차원 스프링으로 모델링하였으며 이 때의 수평방향 스프링상수 k_s 는 Vesic의 이론식에 의해 계산하면 15 kg/cm^3 을 얻을 수 있다. 한편, 스프링 모델의 구조해석은 SAP90 소프트웨어로 수행한 결과 지면으로부터 근입 길이의 40% 정도 즉, 유효길이 L_e 는 $L_e = H + 0.4L$ 로 나타낼 수 있다.

4.2 설치편람 규정검토

건설부 1989년도 도로안전시설 설치편람에 의하면 차중량이 3.5 ton~14 ton의 범위내에서 속도 60 km/h, 보형상 파형단면, 지주는 파이프형, 충돌각도 15°일 때 보부재의 최대변위 110 cm를 넘지 않아야 하고 설계하중은 250 kg/m로 규정되어 있다. 그러므로, 본 연구에서는 현행 설계대로 차량충돌시 구조적 적합성을 만족시켜 주는 지에 대해 검토하여 보았다.

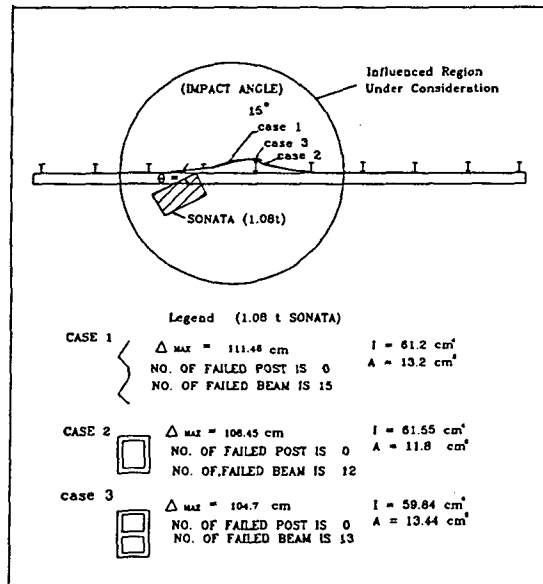


그림 4 보단면형상에 따른 처짐변화

4.3 설계변수에 의한 평가

앞에서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 설계변수로 보와 지주의 단면형상, 충돌각도, 충돌속도 및 차량중량별로 나누어 각각의 경우 현행 표준설계에 따른 단면치수를 적용하여 동력학적 거동을 분석하였다.

1. 단면형상에 따른 비교

차량은 중형 SONATA를 사용하고 충돌속도 100 km/h, 충돌각도 15°, 지주는 H형 단면으로 고정시켜 놓고 첫째 보의 단면에 따라서, 둘째 지주의 단면에 따라서 비교하여 보았다.

① 보의 단면

보의 단면형상은 그림 4에서 보는 바와 같이 파형(W형), 단일박스 및 이중박스형으로 분류하였다. 이 때 파형단면의 최대처짐은 111.46 cm인 반면 단일 및 이중박스형 단면은 각각 106.45 cm, 104.7 cm가 발생하였다. 한편 충돌시 시간에 따른 충격력은 파형단면은 9.1 ton인 반면 단일박스

및 이중박스의 경우 6.9 ton로 대략 24% 정도 충격력의 감소가 발생함을 알 수 있었다.

표 1 보단면에 따른 동력학적 거동비교

단면 형상	최대충격력 (ton)	가속도 (g)	이탈각도 (degree)
파형	9.1	18	-12.73
단일박스형	6.9	13	-9.8
이중박스형	6.9	12	-11.6
탑승자 위험도 상한치		20	-9

② 지주의 단면

지주의 단면형상은 SWS41 강재로 된 H형과 원형파이프단면에 따른 거동이 분석되었는데 보단면은 우리나라 설계시방서에 규정된 파형단면을 사용하였다. 최대처짐의 비교가 그림 7에 나타나 있는데 H형 단면은 111.46 cm, 파이프형은 51 cm가 산출됨을 보여 주고 있다. H형 단면의 최대 충격력이 9.1 ton인데 비하여 파이프형은 4.43 ton으로 무려 51%정도의 충격완화 효과를 보여주고 있다. 아울러 탑승자의 위험도(occupant risk)를 예측할 수 있는 가속도와 이탈각도 각각 4.4 g와 5.3도로 위험상한치인 20g와 9도에 비해 탑승자 안전성 측면에서도 월등함이 입증된다.

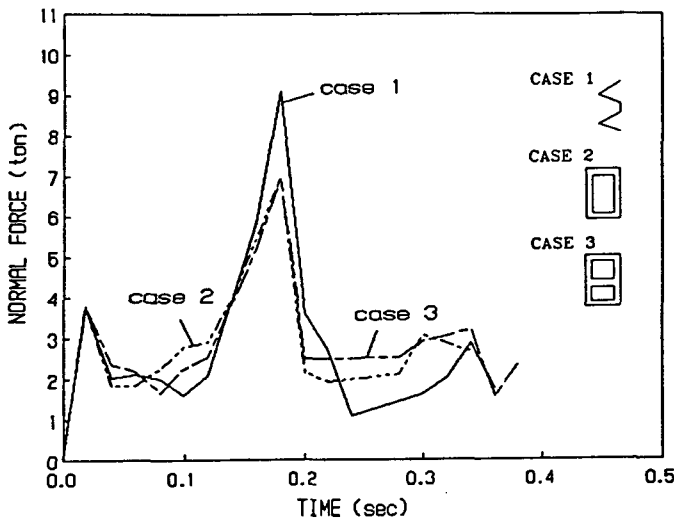


그림 5 보단면형상에 따른 수직력변화

2. 충돌 각도별 비교

보단면은 파형으로 하고, 지주단면은 파이프형으로 고정시켰을 때 차량은 중형차 SONATA가 100 km/h로 충돌하였을 때 충돌각에 따른 동력학적 거동을 비교하였다. 일반적으로 NCHRP 230 보고서에 의하면 충돌시 입사각은 0°-25°로 규정하고 있으므로 본 연구에서는 각각 15°, 25°로 나누어 분석하였다.

표 2 충돌각도에 따른 동력학적 거동비교

충돌각도	최대 처짐 (cm)	가속도 (g)	이탈각도 (degree)
15°	51	9.1	-5.3
25°	111.4	10.2	-14.9
탑승자 위험도 상한치		20	-15

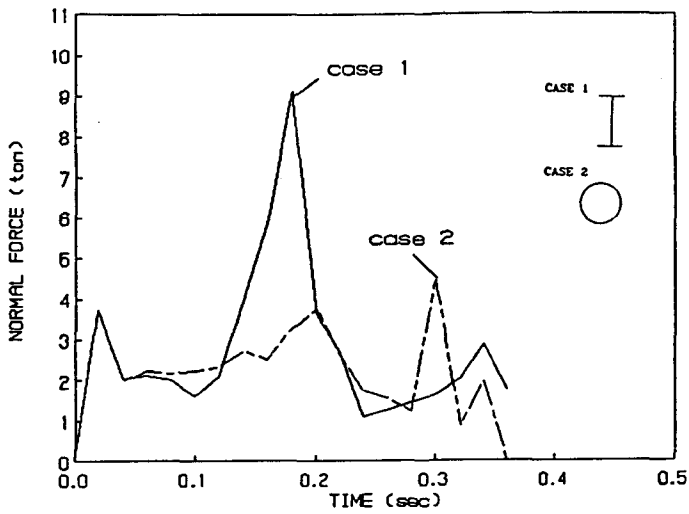
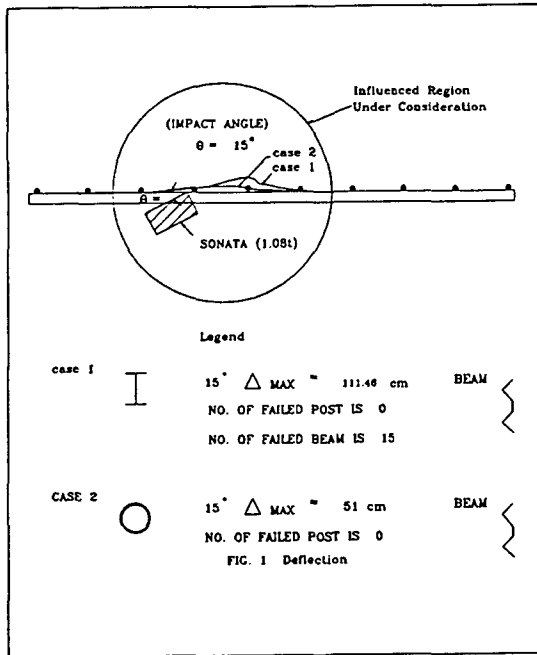


그림 7 지주형상에 따른 수직력변화

3. 충돌 속도별 비교

보단면은 파형으로 하고, 지주단면은 파이프형으로 고정하고 차량은 SONATA가 각도 15도로 충돌하였을때 속도에 따른 거동을 비교하였다. 충돌속도는 NCHRP 230 보고서에 규정되어 있는대로 충돌속도의 범위를 30 km/h - 100 km/h로 정하여 각각 60 km/h와 100 km/h에 대한 비교를 하였다.

표 3 충돌속도에 따른 동력학적 거동비교

충돌속도 (km/h)	최대처짐 (cm)	가속도 (g)	이탈각도 (degree)
60	23.6	4.4	-3.42
100	51	9.1	-5.25
탑승자 위험도상한치		20	-9

4. 차량 중량별 비교

보단면은 파형으로 하고, 지주는 파이프형으로 고정하고 충돌각 15°, 속도 100 km/h로 충돌하였을 때 차량중량에 따른 거동을 비교하였다. 차종은 현재 국도및 고속도로상에 많이 통행되는 중형 SONATA와 대형버스를 모델로 선정하였다.

표 4 차량중량에 따른 동력학적 거동비교

차량 중량 (ton)	최대 처짐 (cm)	가속도 (g)	이탈 각도 (degree)
SONATA (1.08ton)	47	8.8	-5.5
버스 (15.2ton)	790	1.44	-27
탑승자 위험도 상한치		20	-9

5. 결론

첫째, 건설부 도로안전시설 설치편람의 규정에 대한 검토를 해본 결과 설치편람 규정에 의한 허용치에 들 수 있는 차량중량이 3.5~14 ton 까지 되어 있는데 10 ton을 넘게 되면 허용처짐 110 cm를 넘게 되므로 차량중량을 3.5~10 ton으로 제한하거나 허용처짐을 160 cm로 상향 조정하는 것이 요구된다.

둘째, 단면 형상의 비교에서 보의 단면은 파형, 단일박스형, 이중박스형중에서 단일박스형이 충격력 흡수능력면에서나 탑승자 위험도 상한치 즉 가속도, 이탈각도 측면에서 가장 적합한 것으로 평가된다.

세째, 지주의 단면형상은 H형과 파이프형이 비교되었는데 파이프형을 사용하게 되면 최대처짐, 최대충격력, 가속도및 이탈각도에 매우 큰 영향을 보임을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 대한토목학회, 건설부제정 도로교표준시방서 (1992)
- [2] 건설부, 도로안전시설 설치편람 (1989)
- [3] AASHTO, *Roadside Design Guide* (1992)
- [4] G. H. Powell, "BARRIER VII : A Computer Program for Evaluation of Automobile Barrier Systems", *Final Report*, U. C. Berkely, California (1973)
- [5] D. L. Sicking, "Applications of BARRIER VII in the Design of Flexible Barrier", *Texas A & M University* (1988)
- [6] C. B. Parnell, "Development of a Bridge Railing End Treatment at Intersecting Streets and Drives", *Master Thesis*, Texas A & M University (1990)
- [7] D. L. Sicking, "Applications of BARRIER VII in the Design of Flexible Barrier", *Texas A & M University* (1988)
- [8] C. B. Parnell, "Development of a Bridge Railing End Treatment at Intersecting Streets and Drives", *Master Thesis*, Texas A & M University (1990)