

지진격리장치를 갖는 PSC I형 거더교량의 지진거동 특성 및 경제성 분석

Seismic Behavior and Economic efficiency Analysis of Bridge for PSC I-Shaped Girder of isolated device

신영석* 박장호** 최광수*** 홍순호†
Shin, Yung-Seok Park, Jang-Ho Choi, Kwang-Soo Hong, Soon-Ho
(논문접수일 : 2007년 11월 13일 ; 심사종료일 : 2008년 2월 28일)

요 지

지금까지의 지진 관련 연구는 주로 교량 받침 자체의 성능개선이 주요 관심 과제였으나, 본 논문에서는 받침 종류에 따라 교량에 미치는 전반적인 지진거동 특성을 분석하고 교량 공사비에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 실무에서 많이 적용되는 PSC I형 교량에 대해 교량받침의 종류를 변화시키며 교각 높이를 매개변수로 하여 상시 및 지진해석을 수행하였다. 특히 지진해석을 통해 산출한 단면력을 고려하여 PSC I형 교량받침의 변위, 지진하중에 의한 교각 기둥의 직경, 상부 여유 간격 등의 변화를 분석하였다. 고교각인 경우 탄성받침보다는 지진격리장치를 적용하는 것이 지진에 의한 상부구조의 이동량을 줄여 신축이음장치의 규격을 줄일 수 있으므로 차량의 주행성 및 교량의 유지관리 측면에서 바람직 할 것으로 판단되었고, 교량 하부 구조 단면이 축소되어 미관개선 및 경제성 개선의 효과가 있는 것으로 분석되었다. 결국, PSC I형 교량받침 설계시 일률적으로 탄성받침을 적용하는 것보다 정밀한 내진해석을 통해 지진격리장치를 적용하는 것이 구조적정성 측면 및 공사비 측면에서 타당하다는 결론에 도달하였다.

핵심용어 : 지진, PSC I-형 거더교, 교량 받침, 지진격리장치, 응답스펙트럼, 시간이력해석, 고교각, 공사비

Abstract

The research so far has primarily analyzed efficiency improvement but in this research, it analyzes the characteristics of earthquake behavior, with changed pier heights, through ordinary and seismic analysis. For this, the kind of bridge bearing has been changed against PSC I-shaped bridge, which is mostly used in practice, and at all times earthquake analysis has been performed with through height of pier. Especially considering sectional power resulting from earthquake analysis, displacement of PSC I-shaped bridge bearing, diameter of pier pillar by earthquake load, and upper spare gap have been analyzed. In case of high-pier, seismic isolated device is decided as proper for cars' driving and for management of bridge since it decreases movement of upper structure, than elastic bearing, reducing size of elastic connect device, and it's been analyzed it is effective for improvement of fine view and economic efficiency reducing section of lower bridge structure. Finally, when design PSC I-shaped bridge bearing, for the proper structure and high-pier side, applying seismic isolated device through precise inner analysis is proper than applying equal elastic bearing.

Keywords : earthquake, PSC I-shaped Girder Bridge, IPC, bridge bearing, seismic isolated device, response spectrum, time history analysis, high-pier

† 책임저자, (주)동일기술공사 기술연구소 선임연구원 차장
정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 박사수료
Tel: 02-3400-5787 ; Fax: 02-3402-3741
E-mail: ghd@korea.com

* 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 교수

** 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 부교수

*** (주)동일기술공사 기술연구소 책임연구원 상무

· 이 논문에 대한 토론을 2008년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 설계되는 고속도로에서 교량은 과도한 건설 용지비와 인공 지장물로 인한 경제적 부담을 줄이기 위하여 평지보다는 산지 측으로 계획하는 추세이며, 이러한 경향으로 터널과 터널 사이를 연결하는 공간이 자주 발생하게 된다. 이런 공간의 교량은 경간장이 긴 강상자형식이나 PSC BOX형식으로 계획되지만 최근에는 특별히 미관이 요구되는 교량이 아니라면 가장 경제적이고, 유지관리 비용이 저렴한 PSC I형 거더교를 주로 적용한다. 따라서 높은 계획고로 인하여 대부분의 교각이 고교각으로 구성되는 것이 특징이다.

중전의 PSC I형 거더교는 교각 한 개소만 고정단을 채택한 구조로서 지진하중이 재하되면 고정단 교각 기둥에 힘이 집중되어 교각 기둥이 커지는 문제가 초래되었다. 최근에는 상시하중과 추가로 발생하는 지진하중을 각 교각에 분배가 되도록 일률적으로 탄성받침을 적용하여 문제를 해결하였다. 그러나 고교각인 경우 과도한 변위와 모멘트가 발생하여 상시에는 문제가 되지 않던 교량받침 및 신축이음장치 등의 규모가 커지는 문제가 발생하게 되었다.

현재 교량설계에서는 상시하중과 지진하중에 의한 내진설계를 적용하고 있다. 기존의 탄성받침을 사용한 내진설계는 교각기둥의 크기를 증가시켜 강성은 증가하지만 교각기둥에 더 큰 수평력을 유발시킬 뿐만 아니라 과다설계에 의한 취성 파괴의 위험이 있고 지진응답의 증폭효과를 가져온다. 따라서 고정단 교각 기둥으로 하중이 집중되어 기둥단면이 과다하게 된다. 반면에 지진격리장치를 사용한 내진설계를 적용할 경우 교량상부구조와 하부구조 사이에 수평방향으로 유연한 재료를 설치하여 구조물의 고유진동수를 지진에너지가 우세한 대역 밖으로 이동시킨다. 이는 상부 구조물에 전달되는 가속도를 저감시키고 지진격리장치 자체의 감쇠기능을 통해 지진에너지를 흡수하여 분산시킨다. 즉, 지진격리장치의 유연성과 에너지 흡수 능력을 도입하여 구조물로 전달되는 지진 에너지를 대폭 줄이는 것이다.

교량 및 건물에 적용되는 지진격리장치 대한 연구는 1970년대 후반에 미국, 뉴질랜드, 일본, 유럽 등의 국가에서 시작되어 1980년대 중반부터 본격화 되었다. 1990년대에 들어서는 교량 구조물에 있어서의 지진격리시스템의 설계, 단순 모델에 기초한 지진격리장치를 사용한 교량의 거동과와 등의 연구와 비선형 이력곡선을 갖는 지진격리장치의 설계가 이루어졌으며, 2000년대에 들어서는 납과 적층고무의 조합, 마찰력과 탄성 스프링의 조합 및 강재댐퍼등의 다양한 종류의 지진격리시스템이 선보였다 (Anil K., Chopra, 1995; Mario, Paz, 1991).

국내에서는 김대곤(1998)이 적층고무베어링과 납-고무베

어링의 내진 성능에 관한 실험을 하였으며, 구경희(1998)는 면진용 고감쇠 적층고무베어링의 성능특성 실험 및 비선형 거동해석을 연구하였고, 김용길(2000)은 중앙진 지역에서 지진격리교량의 상대강성비에 관한 연구를 하였으며, 김창수(2004)는 면진장치를 사용한 강박스 사교의 지진하중 영향평가에 대한 연구를 하였다. 박선규(2004)는 StLRB시스템(STU + LRB + PETE) 지진격리장치를 적용한 교량의 거동 특성을 비교·분석하였다. 이를 통해 지진격리장치를 적용한 교량이 기존의 Pot받침을 적용한 교량보다 내진성능이 크게 향상됨을 보여주었고, 또한 전단력과 모멘트, 지진변위가 효과적으로 줄어드는 결과를 제시하였다(구경희 등, 1998; 김대곤 등, 1998; 김상호 등, 1999; 김용길, 1999; 김창수, 2004; 최승호 등, 2004).

지금까지의 연구결과를 살펴보면 주로 교량 받침 자체의 성능개선이 주된 연구 방향임을 볼 수 있었다. 이에 반해 본 연구에서는 국내에서 주로 사용되고 있는 교량 받침에 대해 각각 특성별로 지진해석을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 교량하부 설계 후 공정별 공사비 산출을 통해 경제성분석을 하고 경제성 분석 결과를 고려해 바람직한 교량 설계 방향을 제시하고자 한다.

2. 지진응답해석

본 논문에서는 PSC I형 거더 교량을 고교각에 적용할 때 국내 도로교 설계기준에 의거하여 일반교량 받침인 스페리컬과 탄성받침의 경우는 다중모드 스펙트럼해석법을 적용하여 내진 해석을 수행하였고, 지진격리받침인 Lead Rubber Bearing System(이후 LRB)과 Eradi Quake System(이후 EQS)을 적용한 경우는 시간이력해석법을 적용함으로써 현재 교량설계 실무에서 적용되어지고 있는 판례를 적용하였다. 시간이력해석의 경우 인공지진파를 이용하여 지진력을 모사하였다. 또한 응답스펙트럼해석과 시간이력해석시 교각 높이를 매개변수로 하여 받침별 지진 거동 특성 및 경제성을 비교 검토하였다.

2.1 지진해석 모델

지진해석에 의한 결과를 고찰해 보기 위해 고속도로에 적용된(2006) PSC I형 거더교를 대상교량으로 선정하였다. 설계 조건은 1등급(DB-24, DL-24) 교량으로서 7경간이며, 교량의 경간구성은 3@40.0+2@40.0+2@40.0=280.0m이고, 폭원은 12.6m, 주형고는 1.9m이다.

교량의 특성상 2경간 내지 3경간씩 묶어서 연속화하고, 신축이음으로 연결하므로 단순히 받침 및 교각기둥의 거동

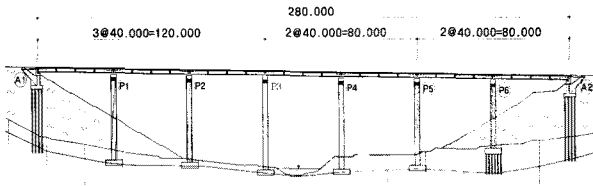


그림 1 대상교량 종단면도

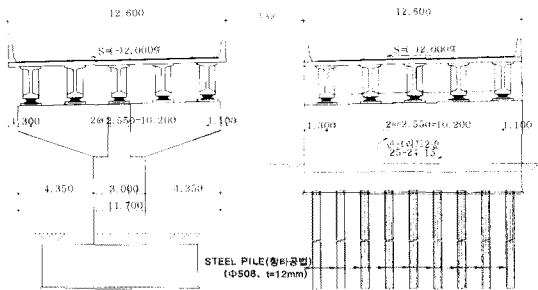
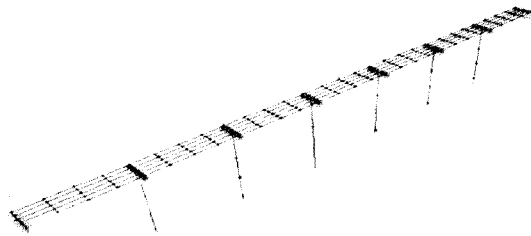
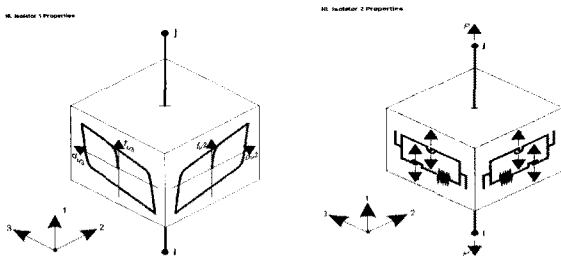


그림 2 대상교량 횡단면도



a) 교량전체 구조계 모델링



b) 받침모델링 Isolator1 c) 받침모델링 Isolator2
그림 3 교량 및 받침 모델링

분석을 위해서는 한 블록(2경간 내지 3경간)만 고려해도 무방하나, 교량의 경제성 분석과 시·중점부 교대의 신축유간 검토를 위해 전체 역계를 고려한 모델링을 하였다.

교량의 지진해석을 위해 CSI사의 SAP2000 프로그램을 사용하였다. 주형과 교각은 Frame요소를 사용하였고, 각 Case 별 교량받침은 비선형 요소인 NLLINK요소를 적용하여 모델링하였다.

2.2 지진해석 방법

지진해석을 위해 국내 도로교 설계기준에서 규정하는 내진

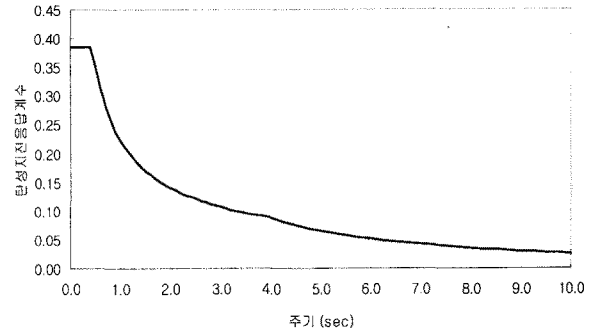


그림 4 내진해석용 설계응답스펙트럼

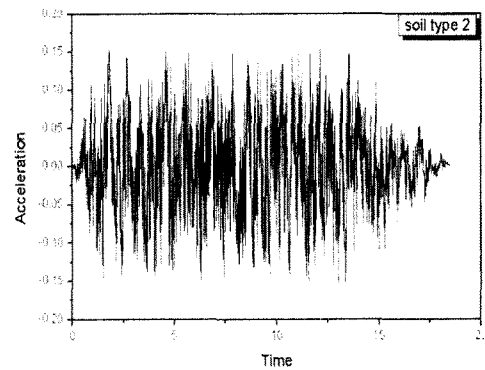


그림 5 시간이력해석용 인공지진파

1구역의 지진구역계수 0.11과 재현주기 1000년에 해당하는 위험도계수 1.4를 적용하여 가속도계수 1.54를 사용하였다.

시간이력해석시 적용한 인공지진파는 미국의 MIT공대에서 개발한 SIMQUAKE 프로그램을 이용하여 생성하였다.

대상교량의 교각높이별 지진시 거동분석을 위해 표 1과 같이 5m~45m까지 9가지 Case를 설정하였다. 최초 교각의 높이별 기둥 직경은 교량사하중, 활하중, 풍하중등의 상시 하중조건만을 고려하여 결정하였다.

교량받침은 스펀리컬 받침과 탄성받침, 지진격리장치인

표 1 교각높이별 해석 Case

구 분 (Case)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
교각높이 H(m)	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
기둥직경 D(m)	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.6	2.8	3.0

표 2 교량받침별 물성치

구 분	EQS	LRB	탄성받침
K_1 (kN/m)	95,754	19,828	$K_v = 432,057$ (kN/m) $K_h = 2,054$ (kN/m)
K_2 (kN/m)	938.4	1,804.3	
K_{off} (kN/m)	3,108	4,135	
Q_d (kN)	76.0	70.0	

LRB와 EQS 등의 4가지 받침을 적용하여 각각의 Case별로 모델링하였다. 지진격리받침의 비선형 이력거동특성을 구현할 때는 표 2와 같이 1차 수평강성 K_1 , 2차 수평강성 K_2 , 유효강성 K_{eff} , 항복강도 Q_d 값이 필요하고, 탄성받침의 경우는 수직강성 K_v 와 수평강성 K_h 이 필요하다.

2.3 지진해석 후 교량받침의 수평력 및 변위분석

2.3.1 수평력

탄성받침과 지진격리장치 모두 교각높이가 높을수록 기둥의 연성도가 증가하여 받침의 수평력이 감소하는 추세를 보였으며, 지진격리장치의 경우 시간이력해석의 특성상 하중항이 비선형이고, 받침자체의 거동특성이 비선형 모델이므로 다소 불규칙한 변화를 보였다.

2.3.2 변위

탄성받침의 경우는 교각높이 증가에 따라 받침변위가 급격한 비율로 증가하지는 않았으나, 교각높이가 25m 이상일 경

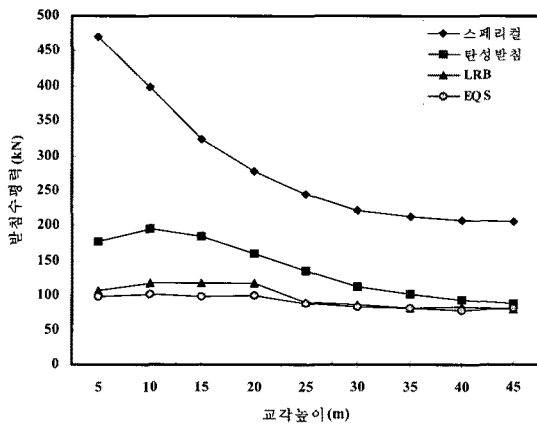


그림 6 교축방향 받침의 수평력

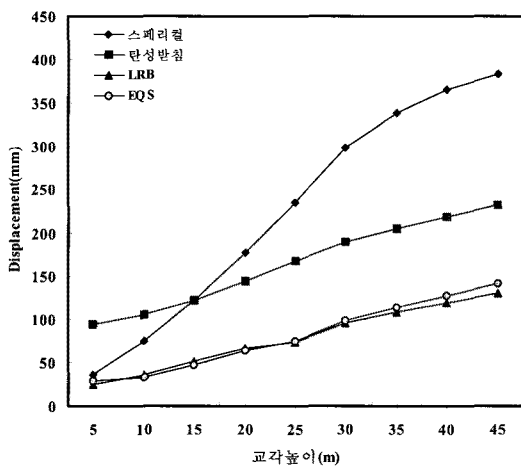


그림 7 교축방향 받침의 변위

우 허용변위 144mm를 초과하였으며, 지진격리장치(LRB와 EQS)의 경우 교각높이가 45m까지 증가해도 허용변위 이내의 변위가 발생하였다.

2.4 교각에 작용하는 모멘트

일점 고정방식을 취하는 스페리컬 받침의 경우 모멘트가 가장 크게 발생하였으며, 지진격리장치의 경우 지진시 다점 고정 거동을 하고 에너지를 소산시키므로 모멘트가 가장 작게 발생하였다.

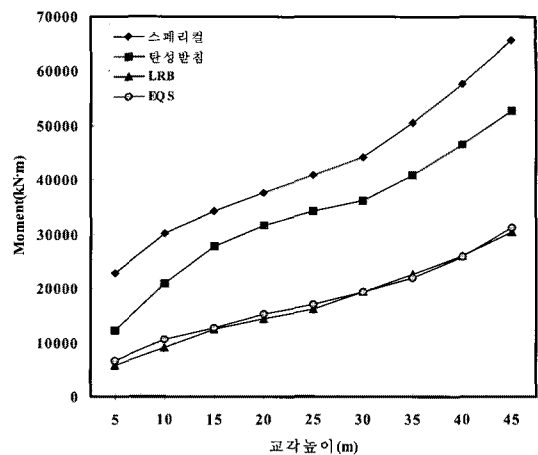


그림 8 교축방향 모멘트(고정단)

2.5 지진력을 고려한 상부구조 여유간격

지진하중을 받는 교량의 경우 상부구조의 교축방향운동은 인접한 진동계의 위상차로 인해 상대변위가 발생한다. 이때 교량 상부구조의 여유간격이 불충분한 경우 거더간 또는 거더와 교대간에 충돌이 발생하여 구조물에 피해를 일으킨다(김상효 등, 1999). 이에 2005년에 개정된 도로교설계기준에서는 지진 시에 상부구조와 교대 혹은 인접하는 상부구조간의 충돌에 의한 주요구조부재의 손상을 방지하고 설계 시 고려된 내진성능이 충분히 발휘될 수 있도록 하기 위하여 여유간격 규정을 신설하였다.

$$\Delta Li = d + \Delta Ls + \Delta Lc + 0.4 \Delta Lt$$

여기서,

ΔLi : 교량의 여유간격 (mm)

d : 지반에 대한 상부구조의 총변위 ($d_i + d_{sub}$) (mm)

ΔLs : 콘크리트의 건조수축에 의한 이동량 (mm)

ΔLc : 콘크리트의 크리프에 의한 이동량 (mm)

ΔLt : 온도변화로 인한 이동량 (mm)

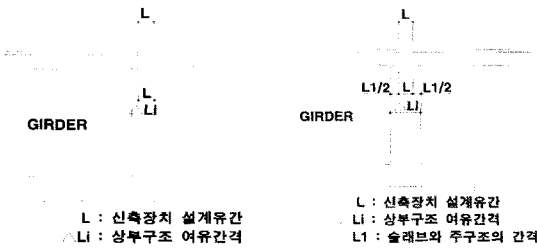


그림 10 교량의 여유간격

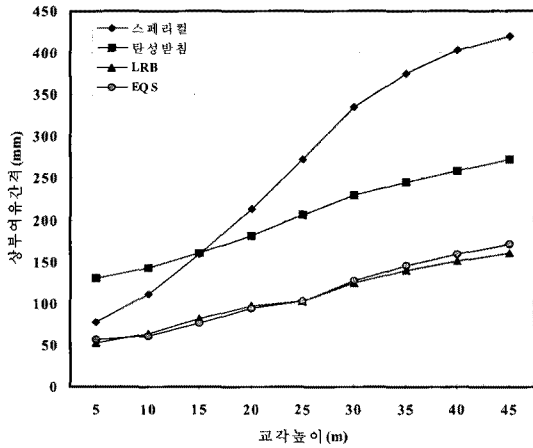


그림 11 지진력을 고려한 상부구조 여유간격

그림 7에서와 같이 탄성받침의 경우 지진시 과도한 수평력과 변위로 인하여 교량받침과 신축이음 규격이 커져 초기 공사비가 상승되며, 특히 차량 공용시 주행성과 유지관리 등의 문제가 예상된다. 지진격리장치를 사용하면 상시조건에서 구한 신축이음 규격으로 지진을 고려한 여유간격을 만족할 수 있는 장점이 있다.

2.6 지진시 지진격리받침 거동

그림 12과 그림 13은 면진받침의 지진시 힘-변위 이력곡선을 보여주고 있다.

지진시 LRB의 경우 1차강성은 낮으로 2차강성은 탄성 고무에 의해 거동하는 특성상 힘에 대한 변위 폭이 큰 마름모꼴 형상이고, EQS의 경우는 1차 마찰강성, 2차 Mer Spring 강성에 의해 거동하는 특성상 직사각형에 가까운 이력형상을 보여주고 있다.

3. 지진해석 결과를 반영한 기동설계 및 공사비 산출

3.1 교각 설계

동적해석 결과를 반영하여 각각의 case별로 교각설계를 통해 적절한 기동직경을 재산정하였다. 직경 산정시 부재의

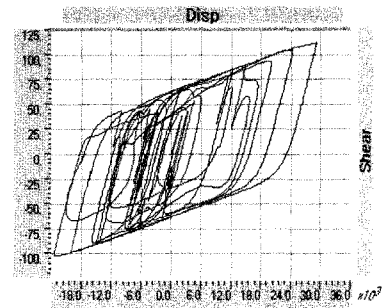


그림 12 LRB받침 적용시 이력곡선

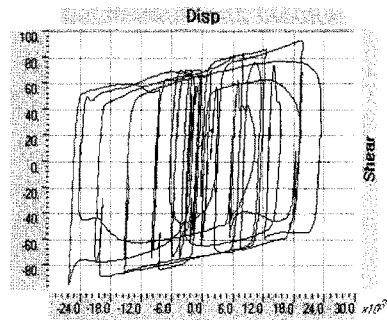


그림 13 EQS받침 적용시 이력곡선

응력 수준은 85% 범위내가 되도록 고려하였고, 철근은 전단면적의 1%이상의 최소철근비를 만족하도록 하였다.

표 3 적정 기동직경(상시 고정단)

교각높이	상 시	스페리컬	탄성받침	LRB	EQS
5m	1.9	2.9	2.4	2.1	2.1
10m	2.0	3.1	2.7	2.3	2.3
15m	2.1	3.2	3.0	2.5	2.5
20m	2.2	3.3	3.2	2.7	2.7
25m	2.3	3.4	3.3	2.8	2.8
30m	2.4	3.5	3.4	3.0	3.0
35m	2.6	3.7	3.5	3.2	3.2
40m	2.8	3.8	3.7	3.3	3.3
45m	3.0	4.0	3.9	3.4	3.4

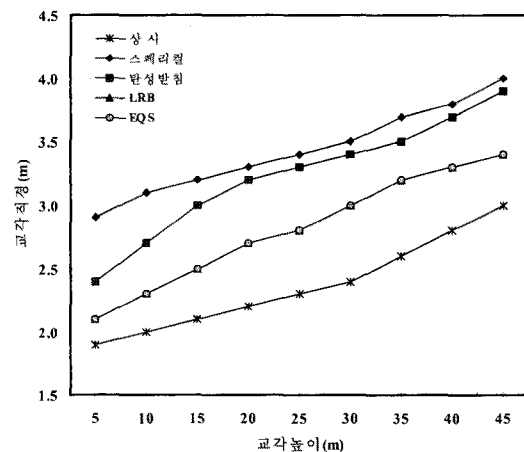


그림 14 적정 기동직경(상시 고정단)

지진격리장치를 적용할 경우 상시 조건만에 의한 기동직경보다 약간 큰 직경이 필요하나 탄성받침의 경우 필요직경이 최대 3.9m로 중공식 타원형 기둥이 필요함을 알 수 있었다.

3.2 공사비 산출

교각설계결과를 고려하여 교각의 높이와 교량의 받침별로 각각의 하부 공사비를 산출하였다. 교각 코핑부, 기둥부, 받침 및 상부 신축이음장치의 수량을 직접 산정하고 교량설계 실무에서 축척된 공사비 자료를 근거로 기타 공정에 대하여는 비례적으로 환증하였다.

표 4 교량공사비 산출을 위한 공종별 단가 (단위 : 원)

공종	규격	단위	금액	비고
콘크리트	1종	m ³	55,845	
	5종	m ³	45,572	
콘크리트타설	철근, 펌프카	m ³	13,000	
	무근, 레미콘	m ³	28,354	
강재거푸집	Climbing Form	m ³	40,000	
철근	SD40	ton	460,000	
철근가공조립	배우복잡	ton	493,977	
교량받침	스페리컬	EA	3,928,000	3000kN
	탄성받침	EA	2,630,000	1750kN
	EQS	EA	3,700,000	
	LRB	EA	3,700,000	
신축이음	Rail Type	개소	2,500,000	No.160
기타공사비				주요공종의 20%
간접비				47%

또한 본 연구에서는 2006년 물가기준으로 공사비를 산출하였고 표 4와 그림 15에서 공사비는 간접비를 고려한 총 공사비 개념이다.

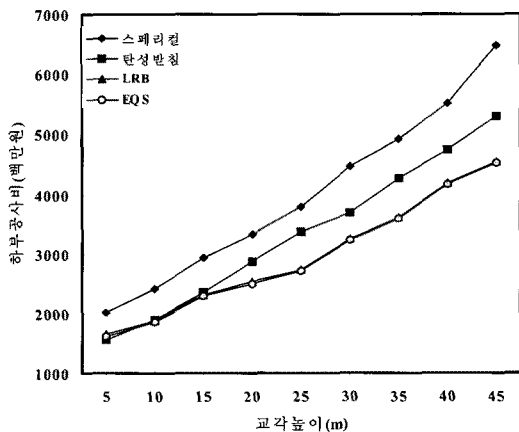


그림 15 지진하중을 고려한 하부공사비

지진격리장치를 적용할 경우 받침 자체의 재료비는 다소 증가하나, 신축이음 및 하부 기둥 규모를 줄일 수 있어 탄성받침 적용 대비 약 10~15%의 공사비 절감효과를 기대할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고교각에서 적용되는 PSC I형 교량에 대해 교량받침의 종류를 변화시키며, 교각 높이를 매개변수로 하여 상시 및 동적해석을 수행하였다. 특히 동적해석을 통해 PSC I형 교량받침의 변위, 지진하중에 의한 교각 기둥의 직경, 상부 여유 간격 등의 분석하였고 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일반적으로 설계 실무에서 PSC BEAM교나 IPC거더교와 같은 중소형 기간 교량에서의 받침은 주로 탄성받침을 적용하여 왔다. 따라서 내진설계시 받침 밑면 전단력이나 교각에 발생하는 단면력이 허용치를 초과할 경우 탄성받침의 고무층수를 늘려서 조정하였고, 교각 기둥의 직경을 늘려 초과 지진력을 부담하도록하여 결과적으로 비경제적인 설계를 초래하였다. 이 경우 지진격리장치를 선별적으로 적용할 경우 내진성능 증대뿐 아니라 비용절감도 동시에 기대하리라 판단된다.
- 2) 지진하중에서 가동단의 탄성받침은 고정단의 탄성받침으로 일시적으로 변환되어 하중이 각 교각으로 분산되지만 이 받침은 지진하중을 감소시키고, 주기를 이동시키는 기능이 없어 기둥에 전단력과 휨모멘트가 과도하게 발생된다. 탄성받침을 적용한 30m이상의 교각에서 기동직경이 3.4m이상의 대구경이 필요하게 된다. 과도한 기동직경은 콘크리트의 특성상 일정한 품질(굳지 않은 콘크리트에서의 수화열로 인한 균열)을 유지하기 어렵고 경제성에서 뒤지므로 중공형 기둥으로 설계한다. 이때 지진격리장치를 적용하여 내진설계를 하면 충실형 기둥의 교각으로 설계가 가능하여 교량의 미관과 시공성이 양호하고 경제적이다.
- 3) 교각높이 30m에서 교량받침 선정 시 지진격리장치를 적용하면 상시하중에서 사용한 규격 80mm의 신축유간의 적용이 가능하다. 하지만 탄성받침을 적용하면 240mm의 신축유간이 필요하고, 스페리컬 받침을 적용하면 300mm의 신축유간이 필요하므로 과도한 규격의 신축이음이 필요하다. 따라서 고교각인 경우 탄성받침보다는 지진격리장치를 적용하는 것이 차량의 주행성 및 교량의 유지관리 측면에서 바람직할 것으로 판단된다.

4) 단성받침을 지진격리장치로 대체할 경우 교량받침의 가격은 약 1.2배정도 증가하나 교량 하부의 공사비는 교각 기둥의 단면적이 약 30%정도 축소되므로 현 시점에서 약 10~15%정도의 공사비 절감효과를 기대할 수 있다. 또한 신축이음의 규격이 작아져서 주행성 및 유지관리에서 유리하며 특히 교각 기둥의 직경이 축소되어 교량의 균형미가 우수하고 시공이 양호하다. 이는 VE(Value Engineering) 관점에서 보면 비용은 감소하고 기능은 향상되는 유형에 해당된다.

참 고 문 헌

구경희, 이재한, 유봉 (1998) 면진용 고감쇠 적층 고무베어링의 성능특성실험 및 비선형 거동해석, 한국지진공학회 논문집, 2(4), pp.73~87.

김대곤, 이상훈, 김대영, 박철립 (1998) 적층고무베어링과 납-고무베어링의 내진 성능에 관한 실험, 한국지진공학회 논문집, 2(4), pp.53~62.

김상효, 마호성, 원정훈 (1999) 거더간 충돌을 고려한 지진하중을 받는 교량의 동적거동분석, 한국전산구조공학회 논문집, 12(3), pp.509~518.

김용길 (1999) 중약진 지역에서 지진격리 교량의 상대강성비에 관한 연구, 공학박사, 서울대학교, p.110.

김창수 (2004) 면진장치를 사용한 강박스 사교의 지진하중 영향평가, 공학석사, 경북대학교, p.83.

최승호, 한경봉, 박선규 (2004) StLRB 지진격리장치를 적용한 교량의 거동특성과 비교분석, 한국구조물진단학회 논문집, 8(1), pp.139~146.

Anil K., Chopra (1995) *Dynamics of Structures*, Prentice-Hall Inc. pp.187~548.

Mario, Paz (1991) *Structural Dynamics*, Van Nostrand Reinhold, 3rd ed, pp.63~198.

Newmark, N.M., Hall, W.J. (1982) *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, pp.58~69.