

단층파쇄대를 통과하는 경안대교의 부지효과를 고려한 지진응답해석

조의경 이장석

Cho, Eu Kyeong Yi, Jang Seok

1. 연구의 배경 및 목적

장대 교량이 위치한 지반에서 지진에 의한 지반 운동은 교량의 길이 방향으로 공간적인 변화를 일으킨다. 지형 변화나 지반 매질의 물성 변화가 있는 비균질한 지반에서 지반 운동의 진폭과 주파수 성분은 변화하고 이 부지 효과(site effect)는 교량의 지진 응답에 지배적인 영향을 미치며 그 영향은 파전파 효과(wave passage effect)에 의한 지반 각 지점의 지진파 도달 시간 차이나 비균질성이 큰 지반에서 파의 다중 반사, 굴절에 의한 영향보다 크다[1]. 기반암에서 지표면으로 갈수록 지반이 연약한 경우, 기반암 운동은 지표면에 도달하면 저주파수 영역에서 증폭된 진폭을 가지게 되고 이는 장대 교량과 같은 장주기 구조물에 치명적일 수 있다[2]. 또한 지반의 고유주기와 교량의 주요 고유주기가 일치할 경우 공진이 발생할 수 있고, 연약 지반 위에 위치한 교각에서는 부재력이 증폭될 수 있다[3]. 또한 분지형 지반과 같이 지형 변화가 있는 지반에 놓인 교량 해석시 1 차원 해석에 의한 지반 운동을 입력으로 사용하면 교량 응답이 저평가될 수 있다[4].

교량의 지진응답은 지반의 공간적 비균질성 뿐만 아니라 지반-구조물 상호 작용의 영향을 받는다. 지반-구조물 상호 작용을 고려한 장대 교량의 지진응답에 관한 연구가 수행되어왔으나 대부분의 경우 교량과 지반을 2 차원으로 모델링하여 해석하므로 3 차원 지반의 영향을 정밀하게 고려할 수 없었고, 지반의 공간적 지형 변화와 물성 변화를 고려하지 못하는 선형 탄성 스프링을 사용하여 지반의 영향을 묘사하였다. 따라서 정밀한 교량의 지진 응답 해석을 위해서는 지반-구조물 상호 작용을 고려할 수 있을 뿐 아니라 교량의 길이 방향으로 지형과 물성이 변하는 경우의 지진 응답 해석을 수행할 수 있는 3 차원 해석기법이 필요하다.

경안천을 통과하는 경안대교는 하천을 횡단하는 연장 270m, 중앙경간 130m 의 3 경간 연속 Extradosed 교와 PSC 박스거더교로 된 접속교로 이루어져 있다. 이 교량은 그림 1.1 과 같이 전단파 속도 $V_s = 250 \sim 500 \text{ m/sec}$ 정도의 낮은 전단강도를 갖는 단층 파쇄대를 횡단하고 있으므로 지반 물성의 분포가 수평방향으로 변화하는 비균질 지반의 영향을 고려한 지진응답 해석이 필요하다.

비균질 지반의 영향과 SSI 효과를 고려한 경안대교의 지진응답 해석을 위하여, 현대건설

기술연구소가 서울대학교 공학연구소와 공동으로 개발한 HYUNSSI 를 사용하여 해석을 수행하였다. HYUNSSI 는 3 차원 직교좌표계에서 3 차원 유한요소와 초유한요소(hyperelement), 스트립 초유한요소(strip hyperelement)를 사용하여 지형과 물성이 변화하는 비균질 지반을 3 차원으로 모델링하고, 지반-구조물 시스템의 지진응답을 해석할 수 있는 프로그램으로, 대만 Hualien 의 내진검증시험에서 실제 지진응답계측 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다[5].

이 연구에서는 HYUNSSI 를 이용하여 경안대교가 건설되는 부지에서 지반의 비균질성에 의한 입력지진의 특성변화를 해석하고, SSI 를 고려한 지진응답해석을 수행한다. 검토 내용을 정리하면 다음과 같다.

- ω 지형변화와 물성 변화에 의한 각 기초 입력 지반 운동의 증폭과 주파수 성분 변화 양상 규명
- ω 입력 지반 운동의 변화가 경안대교의 지진응답에 미치는 영향 해석
- ω 면진장치의 사용에 의한 부재력 감소 효과 검토

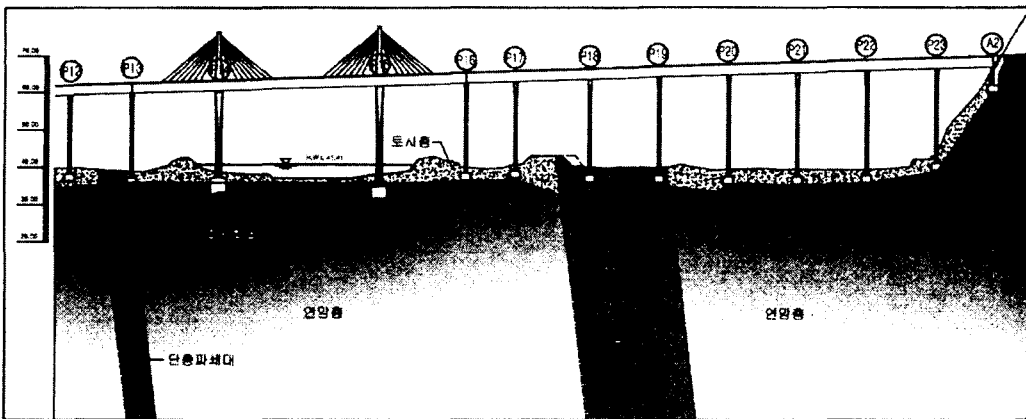


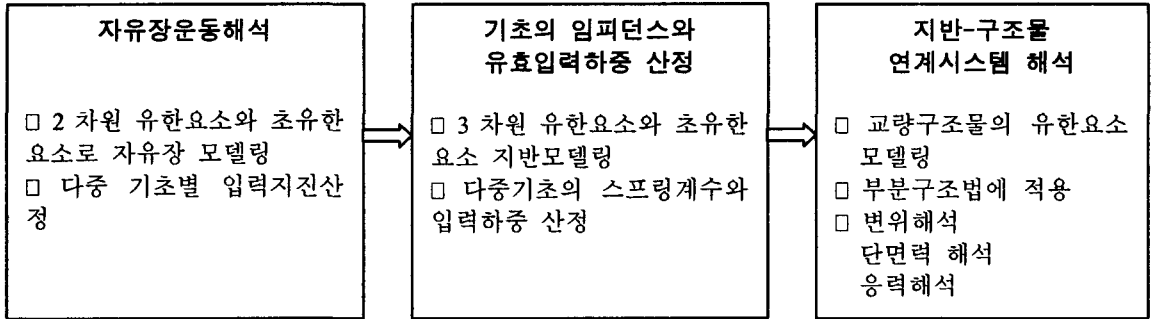
그림 1.1 경안대교 단층 통과 구간 단면도.

2. 비균질 지반에서 SSI 를 고려한 교량의 지진응답 해석 기법

비균질 지반 위 다중 기초 교량의 지반-구조물 상호 작용을 고려한 지진응답 해석을 위하여 3 차원 초유한요소와 3 차원 스트립 초유한요소를 이용한 지반 모델링과 지반-구조물 시스템의 지진 응답 해석 기법을 개발하고 이를 HYUNSSI 로 프로그램화 하였다. HYUNSSI 는 하이브리드 해석법(Hybrid Method)를 사용하여 기초를 포함한 근역 지반은 유한요소로 모델링하고, 무한영역으로의 파전파는 초유한요소[6]를 이용한 전달경계로, 기초 간 지반 영역내의 파전파는 스트립 초유한 요소[5, 7]로 모델링한다. 지반-구조물 시스템의 지진응답 해석은 부분구조법을 사용하며, 지반과 구조물을 독립적으로 모델링한 후 기초에서의 임피던스와 유효입력하중을

이용하여 연계된 지반-구조물 시스템 해석한다. 해석 절차를 정리하면 다음 표와 같다.

표 2.1 비균질지반에서 SSI 를 고려한 교량의 지진응답 해석 절차



HYUNSSI 의 기능과 특징을 정리하면 다음과 같다.

- 프로그램명 : HYUNssi (정보통신부 등록번호:99-01-12-6751)
- 초유한요소, 스트립초유한요소, 유한요소를 사용한 하이브리드 해석법으로 3 차원 지반 모델링
- 지형변화와 물성 변화가 있는 비균질 지반 모델링
- 분지형 지반, 단층과쇄대가 있는 지반에서 지반 운동의 공간적 변화 해석 가능
- 기초간 상호작용 해석
- 기초의 임피던스와 유효입력하중 산정
- 부분구조법을 사용하여 다중입력과 SSI 를 고려한 교량의 지진응답해석 수행

3. 부지효과를 고려한 경안대교의 지진응답해석

3.1 원역통제운동

노두암에 입력되는 통제 운동은 도로교 설계기준 내진설계편에 제시된 설계응답스펙트럼에 부합하는 5 종의 인공지진시간이력을 생성하여 사용하며 지진응답은 각 5 종의 입력에 대한 결과를 평균(Ensemble)한다. 이 방법은 원자력 시설의 내진해석시 사용하는 방법[8]으로 인공적으로 생성된 시간이력의 진동수 특성의 편차에 의한 응답 결과의 왜곡을 방지할 수 있다. 인공지진시간이력의 앙상블 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼을 비교하여 그림 3.1 에 나타내었다.

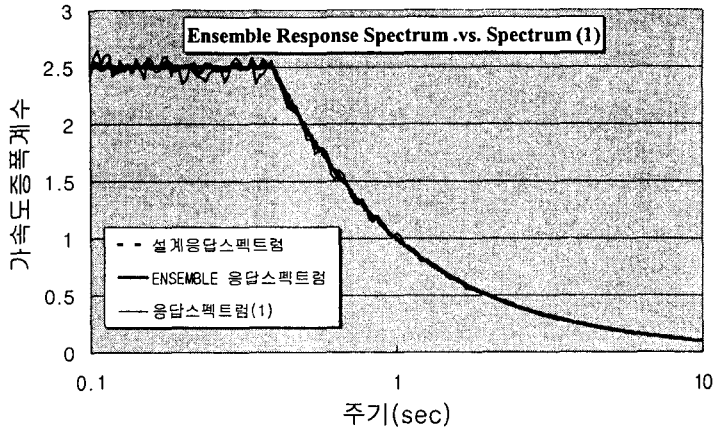


그림 3.1 인공지진 시간이력의 가속도 응답스펙트럼.

3.2 자유장 운동 해석

3.2.1 비균질 지반 모델링

Extradosed 교 구간의 지반모델은 단층파쇄대를 포함한 주변지반의 거동이 묘사될 수 있도록 그림 3.2 와 같이 각 기초 위치와 단층파쇄대 구간에는 유한요소를 사용하고 유한요소영역 사이의 지반은 스트립 초유한 요소를, 외부경계에는 초유한요소 전달경계를 부착하여 모델링하였다.

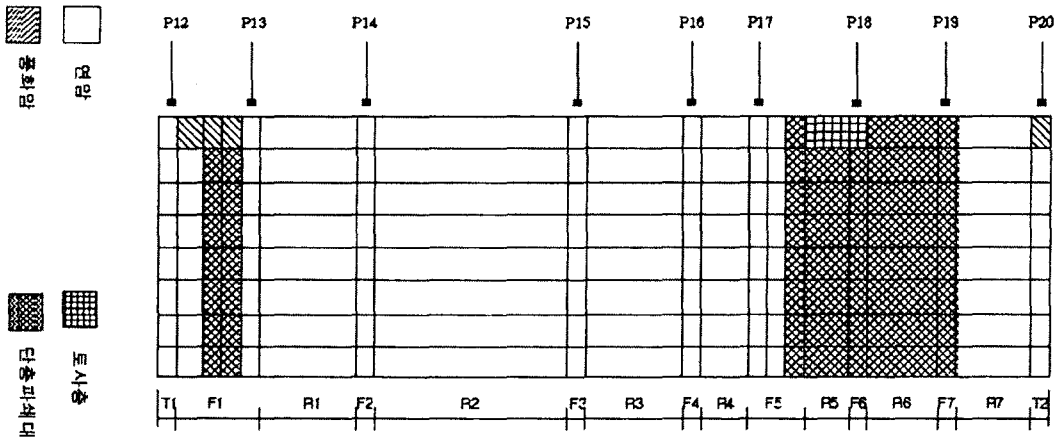


그림 3.2 단층파쇄대를 포함한 지반의 모델링.

지반조사 결과 경안대교 부지는 4 가지의 암종으로 구성되어 있고 해석에서는 표 3.1 과 같은 동적 물성치를 적용하였다.

표 3.1 부지의 암종과 물성.

구분	전단파속도(m/sec^2)	밀도(t/m^3)	포아송비	감쇄비
토사층	210	1.9	0.425	0.05
풍화암	430	2.1	0.371	0.05
연암	750	2.3	0.347	0.05
단층파쇄대	270	2.0	0.423	0.05

3.2.2 자유장 운동 해석 결과와 분석

경안대교 부지에서 지반운동의 공간적 변화를 입력가속도에 대한 해당 지점 지반가속도의 증폭비율로 정리하여 표 3.2 와 표 3.3 에 나타내었다. 수평방향으로의 공간적 변화는 경안대교 주교량의 기초가 놓이는 위치에서 검토하였으며 수직방향으로의 공간적 변화는 주교량의 주탑기초(P14)위치에 대하여 검토하였다. 단층대에 가까운 교각(P13, P16) 위치에서 지반운동의 증폭이 크다는 것을 알 수 있고 단층대 영향권내인 P13 에서 교축방향 지진입력시 0.202g 로 최대 증폭이 발생한다.

표 3.2 최대지반가속도의 수평방향 변화 증폭비(지표운동)

구분	교축방향 지진				교축직각방향 지진			
	P13	P14	P15	P16	P13	P14	P15	P16
최대 가속도(g)	0.202	0.180	0.179	0.196	0.165	0.167	0.159	0.156
증폭비	1.31	1.17	1.16	1.27	1.07	1.08	1.03	1.01

표 3.3 최대지반가속도의 수직방향 변화 증폭비(P14 위치의 운동)

구분	교축방향 지진				교축직각방향 지진			
	GL-0	GL-22.5	GL-37.5	GL-52.5	GL-0	GL-22.5	GL-37.5	GL-52.5
최대 가속도(g)	0.180	0.141	0.149	0.153	0.167	0.135	0.134	0.131
증폭비	1.17	0.92	0.97	0.99	1.08	0.88	0.87	0.85

그림 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 에 교축방향 지반운동과 교축직각방향 지반운동에 대한 각 교각 위치에서

가속도 응답스펙트럼의 수평방향과 수직방향으로의 변화를 나타내었다. 수평방향의 변화를 보면 1 초 이하의 저주기 영역에서 지반운동의 증폭이 발생하고 P13 위치에서 특히 현저하다. 수직방향 변화를 보면 지표면에 가까울수록 더 큰 가속도 응답스펙트럼을 보인다. 경안대교 하천부 지반의 지배 고유주기는 0.12 초(8.7Hz)부근과 0.35 초(2.8Hz)부근에서 나타난다.

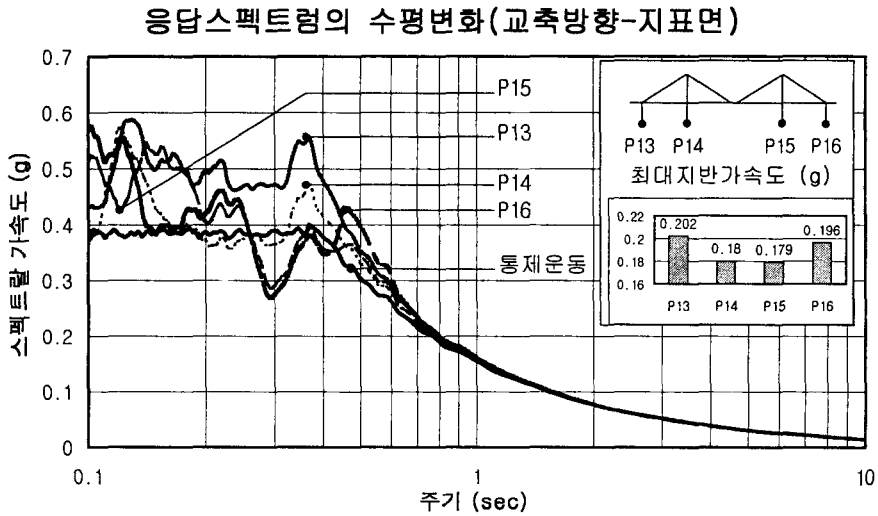


그림 3.3 교축방향 지반운동시 가속도 응답스펙트럼의 수평변화.

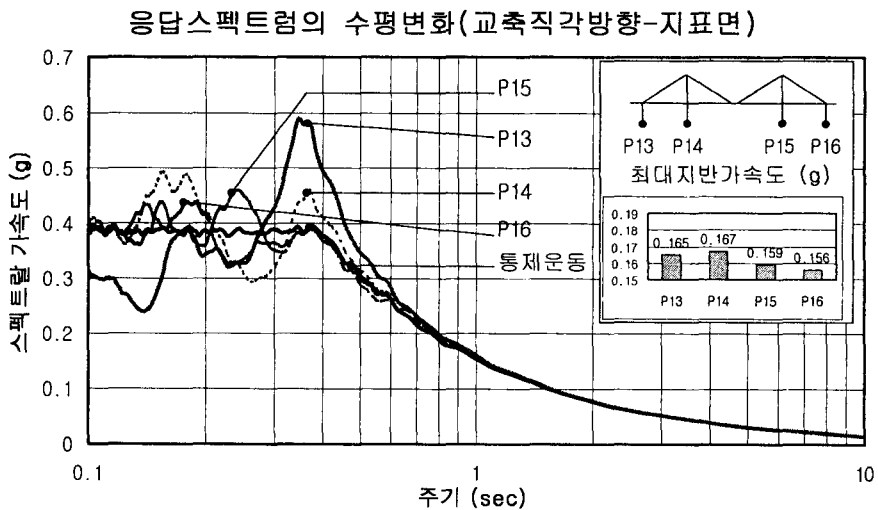


그림 3.4 교축직각방향 지반운동시 가속도 응답스펙트럼의 수평변화.

응답스펙트럼의 수직변화(교축방향-P14)

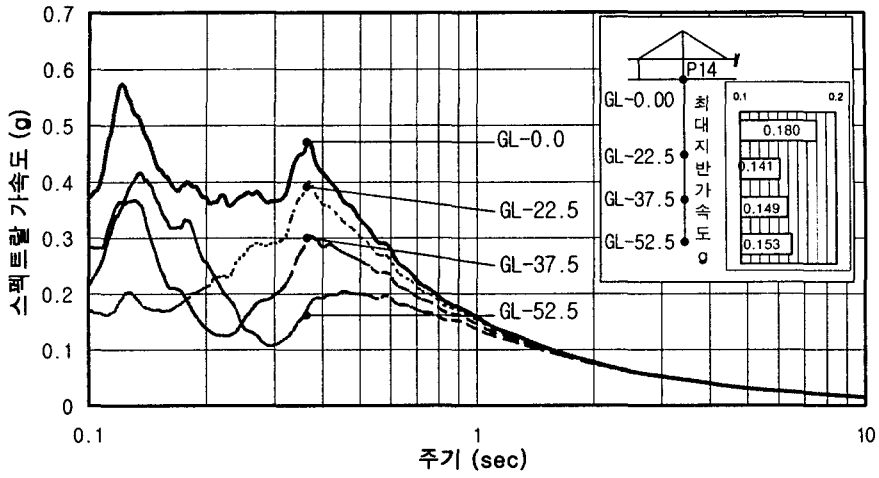


그림 3.5 교축방향 지반운동시 가속도 응답스펙트럼의 수직변화.

응답스펙트럼의 수직변화(교축직각방향-P14)

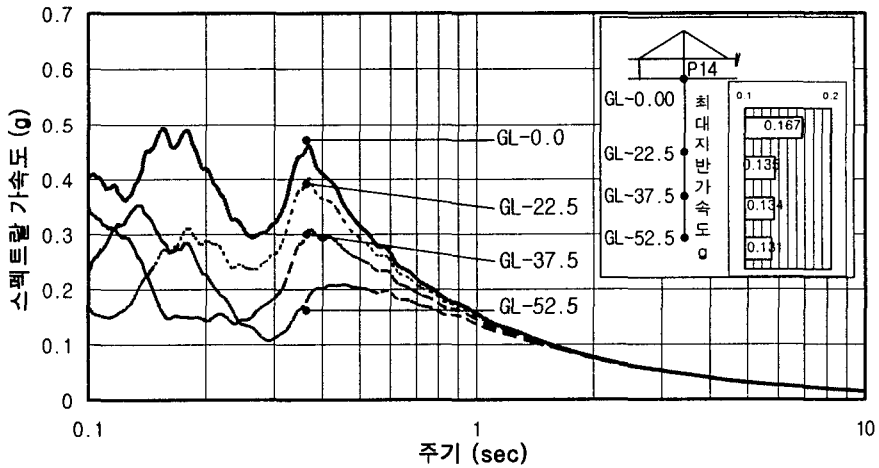


그림 3.6 교축직각방향 지반운동시 가속도 응답스펙트럼의 수직변화.

3.3 경안대교의 지진응답해석

다중 입력을 고려한 동적응답해석이 가능한 HYUNSTAY[9]를 사용하여 자유장 해석으로 구한 지반운동을 입력으로 하는 경안대교의 지진응답해석을 수행하였다. 교량은 3차원 뼈대요소를 사용하여 모델링하고, 면진장치인 LRB을 사용하였다. 지반-구조물 상호 작용 효과를 고려하기 위하여 기초 임피던스로부터 구한 지반 스프링을 기초와 지반의 접합부에 부착하여 해석하였다. 경안대교의 모드해석결과는 다음 표 3.4와 같다.

표 3.4 경안대교의 주요 모드 해석 결과

모드번호	고유주기 T(sec)	고유진동수 (Hz)	비고
1	2.328	0.430	상판의 종방향 운동
2	2.322	0.431	상판의 횡방향 운동
3	2.186	0.458	상판의 회전
4	1.959	0.511	상판의 휨
10	0.453	2.206	교각 단독운동

인공지진파 1,2,3 을 입력지반운동으로 할 경우와 단층파쇄대의 영향을 고려한 자유장 해석으로 구한 기초별 지반 운동을 입력으로 사용한 경우에 대하여 교각 하단에 발생하는 최대 모멘트를 구하고 그 결과를 그림 3.7 과 그림 3.8 에 비교하여 나타내었다. 그림을 보면 비균질 지반의 영향을 고려하여 구한 입력지반운동을 사용한 경우 발생하는 최대모멘트는 인공지진파 1, 2 ,3 을 입력지반운동으로 했을 때보다 비슷하거나 작다는 것을 알 수 있다. 이는 그림 3.3, 그림 3.4 와 같이 비균질 지반의 영향에 의한 지반 운동의 증폭은 주기 1 초 이하의 영역에서 발생하나 교량 지배모드의 주기는 표 3.4 와 같이 2 초 부근에 있기 때문에 지반운동의 증폭이 교량의 지진응답에 영향을 미치지 않기 때문이다.

그림 3.9 는 면진시스템(LRB)의 효과를 나타낸 것이다. 모드참여율이 가장 큰 교축병진모드의 고유주기에서 가속도 응답스펙트럼의 값은 비면진 시스템의 경우 0.55g 이나 면진시스템일 경우는 0.07g 로 87% 이상의 저감 효과를 나타내는 것을 알 수 있다.

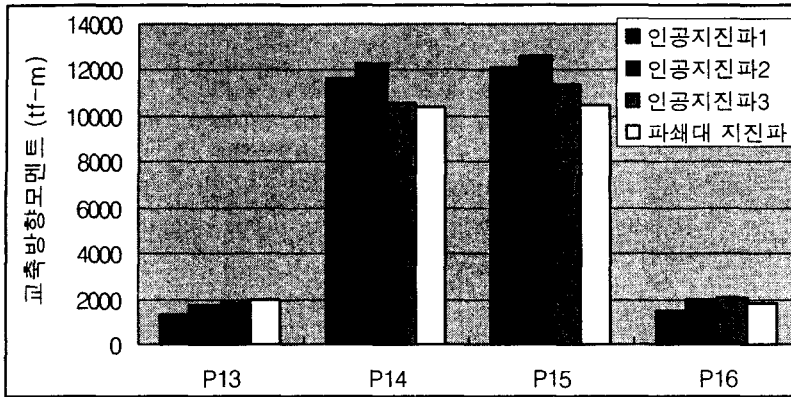


그림 3.7 교축방향 지반운동에 의해 발생한 교각 하단 모멘트 비교.

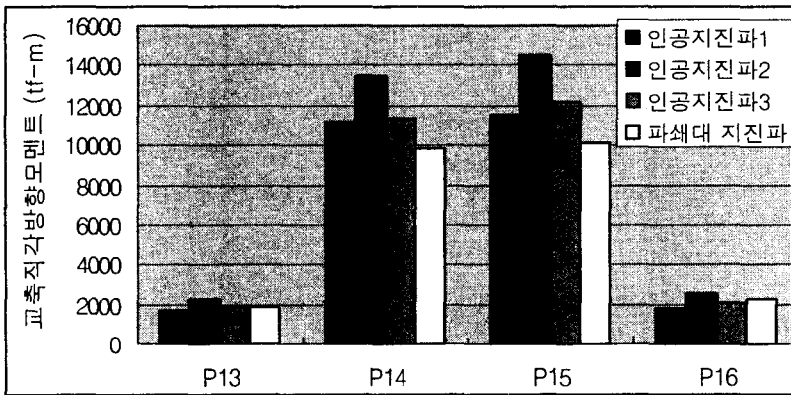


그림 3.8 교축직각방향 지반운동에 의해 발생한 교각 하단 모멘트 비교.

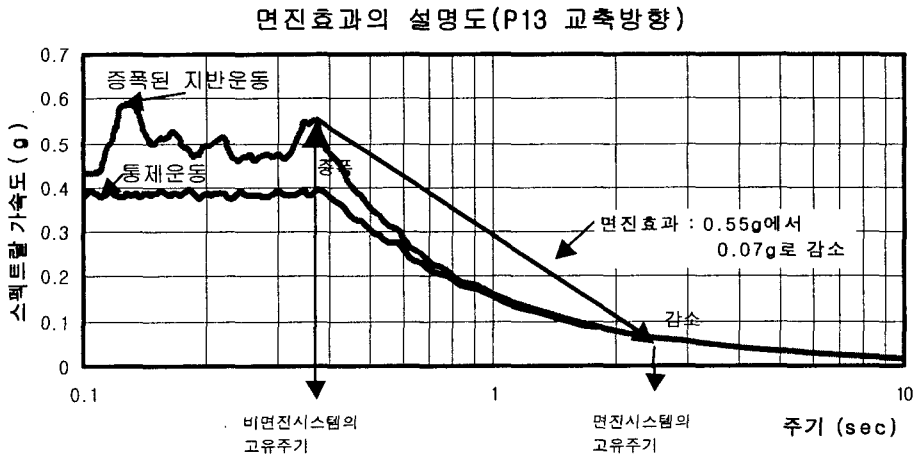


그림 3.9 면진효과 설명도.

4. 결 론

비균질 지반의 영향과 지반-구조물 상호작용의 영향을 고려한 구조물의 지진응답 해석을 할 수 있는 HYUNSSI 를 이용하여 단층파쇄대가 있는 지반 위에 위치한 경안대교의 지진응답 해석을 수행하였다. 해석 결과는 다음과 같다.

- ω 단층파쇄대의 영향으로 지반운동의 증폭이 발생하며 이는 단층파쇄대 부근의 기초 위치에서 더욱 현저하다.
- ω 지반운동이 증폭은 주기 1 초 이하의 영역에서 발생하나 교량의 지배주기는 2 초 부근에 있기 때문에 교량에 발생하는 최대 부재력은 지반운동 증폭의 영향을 받지 않는다.
- ω 면진장치를 사용할 경우 교량의 지배주기가 지반운동의 증폭이 발생하지 않는 고주기 영역으로 이동하여 지반운동 증폭의 영향을 받지 않게 된다.
- ω HYUNSSI 는 부지효과에 의한 지반운동의 증폭과 지반-구조물 상호 작용을 고려한 구조물의 지진응답해석에 적용할 수 있다.

참고 문헌

1. Keshishian, P., and Der Kiureghian, A. (1998). Effect of Soil-Structure Interaction on Response to Spatially Varying Ground Motion, *Structural Engineers World Congress*.
2. Kornkasem, W., Nam, S. I., Foutch, A. A., Ghaboussi, J., and Aschheim, M. A. (2000). Seismic Analysis of a Truss-arch Bridge Crossing the Mississippi River, *12th World Conference on Earthquake Engineering*.
3. Zembaty, Z., and Rutenberg, A. (1998). On the Sensitivity of Bridge Seismic Response with Local Soil Amplification, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 1095-1099.
4. Gohl, B., Sorensen, E., Wu, G., and Pennells, E. (1997). Nonlinear Soil-structure Interaction Analyses of a 2-Span Bridge on Soft Silt Foundation, *National Seismic Conference on Bridges and Highways*, pp. 177-191
5. 현대건설주식회사 기술연구소 (1996). 특수구조물에서의 내진설계를 위한 SSI 해석기법 개발, 연구기관:서울대학교 공학연구소.
6. Kim, J. K., Koh, H. M., Kwon, K. J., and Yi, J. S. (2000). A Three-dimensional Transmitting boundary formulated in Cartesian Co-ordinate System for the Dynamics of Non-axisymmetric Foundations, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, pp. 1527-1546.
7. 이장석 (2001). 비균질 지반에서의 동적 지반-구조물 상호작용 해석을 위한 3차원 스트립 초유한요소, 박사학위논문, 서울대학교.
8. 한국원자력안전기술원 (1997). 지반-구조물 시스템 내진해석방법의 적용성 연구(V), 최종보고서, 연구기관:기초전력공학공동연구소.
9. 현대건설주식회사 기술연구소 (1999). 사장교 해석 프로그램 전·후처리 시스템 개발, 연구기관:서울대학교 공학연구소.