

지진에 대비한 기초분리 교량의 설계법에 관한 연구(I)

A Study of Seismic Resistant Design for Base-Isolated Bridges(I)

이상수¹

Lee, Sang Soo

요약 : 기초 분리 기법과 분리 장치의 지진 하중에 대한 구조물의 에너지 전달력의 감소 효과에 대한 인식은 증가되어 왔으나, 기초 분리 교량의 지진 응답을 예측하기 위한 수단으로 사용되는 비선형 동적 해석 방법은 소요되는 경비 및 장비의 제한으로 설계용으로는 제한적이다. 본 연구는 기초 분리 교량의 설계에 있어서 시간 이력 해석법에 의하지 않고, 탄성 해석법의 적용을 위한 기초 자료로써, 지진 발생시 구조물의 비선형 응답의 해석의 탄성 해석법 적용성을 검토하였다.

본 연구는 기초 분리 교량의 하중-변위를 항복전과 항복후 상태로 분리하여, 주기 이전과 유효 주기, 모드 기여율의 변화를 고찰하였다. 또한, 교각 높이별 P.C교에 인공 지진파를 이용한 시간 이력 해석을 수행하여 분리 장치의 상태 변화를 고려한 모드 해석법과 비교하였다. 해석 결과, 분리 장치의 상태 변화는 주로 제1 모드 주기에 영향을 미치며, 지진 응답은 분리 장치의 상태 변화에 따라 지배되나 일정 범위로 수렴하였다. 이에, bilinear 분리 장치에 의한 비선형 지진 응답의 유효 강성에 의한 모드 해석의 적용 가능성을 확인하였다. 또한, bilinear 장치로 기초 분리된 교량에 대해 교각 높이 변화를 고려한 선형 탄성 해석과 비선형 시간 이력 해석 결과를 비교하였다.

ABSTRACT : The base isolation technique and its benefits in reducing the transmitted earthquake energy into a structure have gained increasing recognition during the last two decades.

Unfortunately, the current available design procedures, especially for base-isolated bridges, seem inadequate and too restrictive. As a result, practical design procedure still relies upon a series of deterministic time history analyses. In this study, the evaluation of the possibility of the normal mode method to predict the nonlinear seismic responses of base isolated bridges has been performed. The applicability has been examined through the

1) 정회원, 새길엔지니어링 구조기술사, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 1998년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

numerical approach with isolator's elastic or plastic states of the base isolated bridges. Numerical results show that the 1st. mode period and the various responses are varied with the state but are converged. And, the result show that the normal mode method is applicable to predict the seismic responses and to design the base isolated bridge.

Various analysis method to bridges with bilinearized hysteresis isolator and various pier heights are evaluated.

핵심 용어 : 지진, 기초 분리, 교량, 비선형 응답, 탄성 설계법, bilinear

KEYWORDS : Earthquake, Base-Isolation, Bridges, Nonlinear response, bilinear

1. 서 론

지진은 인류가 접한 가장 큰 재앙으로, 비록 지진 발생 확률이 작은 경우에도, 지진에 대비책이 없을 경우 예상되는 사회적 손실은 실로 막대하다. 따라서, 현재 세계적으로 35개국에서 내진 설계를 의무적으로 규정하고 있으며, 지진 다발 국가는 물론 지진 발생 위험이 적은 국가에도 내진 설계를 규정하여 지진에 대한 방재 대책을 수립하고, 예상되는 피해를 최소화하려는 노력을 하고 있다.

그러나, 탄성 설계법을 지진과 같은 특수 하중에 적용하는 것은 비경제적으로 탄성 설계법에 의한 내진 설계의 적용성은 매우 제한적이다. 따라서 재래 주기가 긴 지진과 같은 특수하중에 대해서는 일정량의 소성 변형을 허용하는 소성설계법을 적용하는 것이 일반적이다.

이에 소성 변형을 허용하여 과다 설계를 방지 하되, 경로 제어가 가능하며, 피해 복구가 용이한 방법으로 기초 분리 방법(Base-Isolation)이 100여년 전부터 시도되어 왔으며, 1983년 미국, 1981년 New Zealand 및 1992년 일본에서 기초 분리에 대한 소성설계법을 채택하고 있다.

그러나 현재 제시된 설계법은 등가 수평력과 보정 계수를 사용한 단순한 설계법으로 특정 장치에 국한되어 적용되고 있는 실정이다.

최근 국내에도 기초 분리에 대한 연구가 진행

되고, 차세대 원자력 발전소 및 고속철도와 서해 대교, 영종대교등의 설계에 적용되고 있으나, 설계 방법이 제시되지 못하여 기초 분리된 구조물의 설계는 비선형 시간 이력 해석에 의존하고 있는 실정이다.

그러나, 시간 이력 해석법을 설계에 적용하는 것은 설계 범주를 초과하는 것으로, 해석 장비 부족과 분리 장치의 비선형 거동에 대한 자료와 지역 특성에 의한 지진파의 산정 등의 선결되어야 할 과제가 산재하고 있다.

이에, 비탄성 진동 해석에 유효 강성파 감쇠별 응답 스펙트럼 설계법의 적용성을 검토하여, 지진에 대한 비선형 응답 예측 및 단순화된 설계법 개발에 활용하고자 한다.

2. 비선형 동적 해석

2.1 비선형 하중 변위 곡선

부재의 실제 거동에 근접한 하중-변위 곡선을 사용하여 지진 하중에 의한 응답을 예측하는 연구가 진행되어 왔으며, 하중의 조건을 고려한 실험의 중요한 결과와 제안된 여러 가지 비선형 하중-변위 이력 곡선에 대한 고찰은 Banon과 Roufaiel 등에 의해서 이루어졌다.

하중-변위 이력 곡선에 대한 해석 모형으로 여러 가지가 제시되고 있으며, 재료 종류 및 기하

구조 특성에 따라 모형을 선정하여야 하며, 본 연구에서는 기초 분리 장치로써 (그림 1)과 같은 자기 이력 특성의 강재 Damper를 사용하였으며, 분리 장치는 탄성 강성과 항복후 강성을 갖는 Bilinear 모형으로 모사하였다.

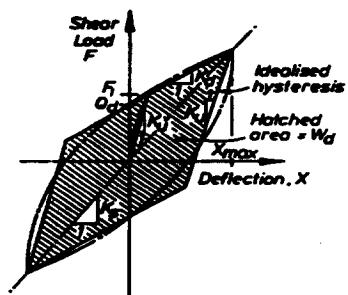


그림 1. 강재 Damper의 하중-변위 곡선

2.2 Bilinear 재료의 응답 지수

동적 하중에 의한 구조물의 설계는 진동 시간 동안의 응답 이력보다 절대 최대 변위로 측정되고 있다. 비선형 거동에서는 절대 최대 변위를 구조물의 초기 항복 변위로 나눈 값으로 정의되는 최대 변위 연성도(μ)와 초기 및 항복후 강성 및 항복력이 널리 사용되고 있다.

지진 발생 동안 구조물에 입력되는 에너지는 진동이 끝나면 모두 소산되며, 재료의 비선형에 의해 소산되는 이력 에너지 $E_h(t)$ 는 지진의 진폭과 이력 거동에 의하여 지배된다.

지진의 지속 시간 동안에 정형화된 Bilinear 힘-변위 곡선은 (그림 2)과 같이 초기 강성 K_o 과 항복후 강성 aK_o 및 항복력 F_y 에 따라 변화하며, 응답 이력은 반복적인 응력 교변 거동을 포함하고, 양방향의 거동이 상이할 수도 있다. 또한 이력 곡선은 원점을 중심으로 하여 발생하지도 않는다.

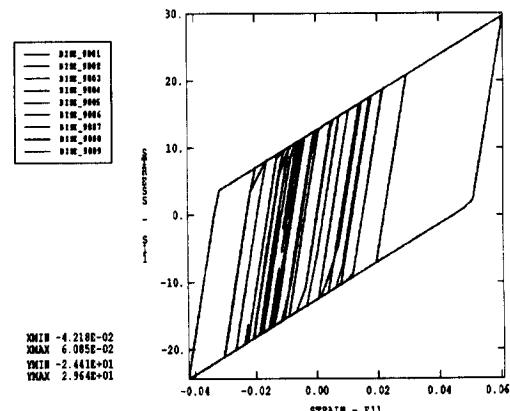
Bilinear 이력 곡선에 대해서 유효 강성 K_{eff} 과 추가 감쇠 E_h 는 초기 강성 k_o 와 초기와 항복

후 강성비 a 및 최대 변위 연성도 μ 를 사용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$K_{eff} = K_o \left[\frac{1-a}{\mu} + a \right] \quad (1)$$

$$E_h = \frac{2}{\pi} (1-a) \left(\frac{\mu-1}{\mu^2} \right) \frac{k_o}{K_{eff}} \quad (2)$$

$$0.0 \leq R = \frac{(1-a)(\mu-1)}{\mu[1+a(\mu-1)]} \leq 1.0 \quad (3)$$



$K_o = 2.0W/m$, $aK_o = 10\%W/m$, $\sigma_y = 1.0\%W$

그림 2. BHL 2-10-1 이력 곡선

여기서 BLH(Bilinear Hysteresis) 기호는 분리 장치의 자중에 대한 초기 강성, 항복 후 강성, 항복력의 백분율을 표시한다.

추가 감쇠는 이력 곡선의 대각선 폭에 의해 추정되므로 이력 곡선의 최대 힘과 변위에 의한 사각형 면적 대 이력 곡선 면적 비를 계수 R 로 표시하면, R 은 선형 탄성일 경우 0.0이며, 초기 강성이 대단히 크고 완전 탄-소성 상태일 때 최대 1.0의 값을 갖는다. 이에, 본 연구에서는 추가 감쇠는 이력 곡선으로 구성된 힘-변위 곡선의 전체 면적에 대한 내부 면적비를 사용하였다

2.3 기초 분리 교량의 상태 특성 및 주기 이전

기초 분리된 교량의 지진에 대한 정확한 해석은 일반적인 경우에 비선형 해석 방법에 의하여야 하나, 기초 분리 장치를 사용한 경우에 구조물의 비탄성 거동은 기초 분리 장치에서만 발생하므로, 기초 분리된 교량의 지진시 거동에 대한 선형 해석 방법의 적용 가능성이 있다. 또한, 선형 구조물의 지진 응답에 대한 해석은 응답 스펙트럼에 의한 모드 해석법을 사용하는 것이 가장 보편적이며 효과적이다.

본 연구에서는 해석 대상 교량의 하중-변위 특성을 다음과 같이 분리 장치의 상태 특성에 따라 표기하였다.

- (1) 비분리 탄성 상태 (Unisolated State : UI)
- (2) 기초 분리 항복 전 상태 (Isolated Unyielding State : IUY)
- (3) 기초 분리 항복 후 상태 (Isolated Yielding State : IY)

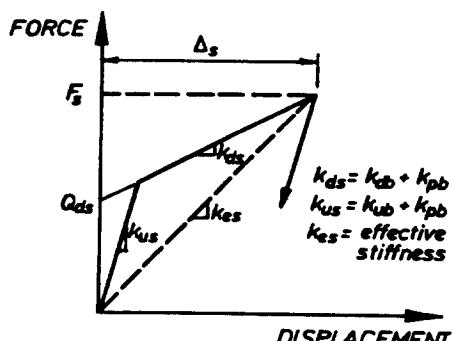


그림 3. 기초 분리 교량의 하중-변위 특성

(그림 4)에 기초 분리 장치의 상태별 제1차, 제2차 주기를 나타내었다. Lee, D.M에 의한 연구와 같이 기초 분리 장치는 기초 비분리 상태의 고유 주기가 짧은 교량에서 현저한 주기 이전의

현상을 발생시키며, 기초 분리 항복 후 상태에서는 제2주기의 이전에 비해 제1주기의 이전비가 현저하였다.

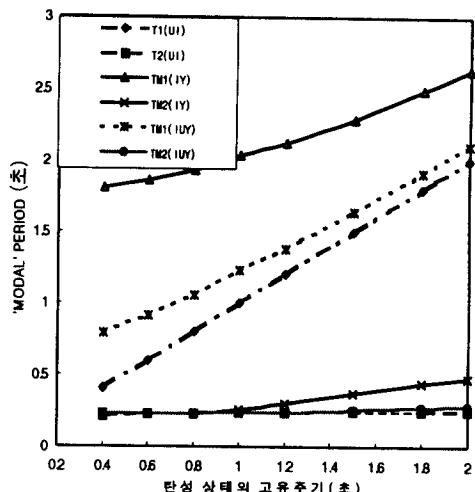


그림 4. 기초 분리 상태별 주기 이전

(그림 5)에 첫번째와 두번째 고유 주기의 주기 이전을 상태 특성에 따라 주기 이전율 S로 표시하였다.

$$S(IUY)_n = T_n(IUY) / T_n(UI)$$

$$S(IY)_n = T_n(IY) / T_n(UI)$$

제1번 주기에 대한 분리 탄성 상태(IUY)에 대한 주기 이전율은 평균 1.3배이고, 항복 상태(IY)의 주기 이전율은 단주기구조($T_1(UI) \leq 0.3$ 초)에서 4.5배이며, 장주기구조($T_1(UI) = 0.2$ 초)인 경우 최소 1.3배이며, 제2주기의 이전율은 10% 이내로 미소하였다.

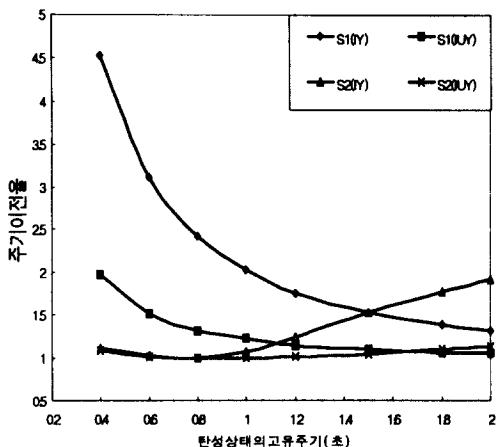


그림 5. 기초 분리 상태별 주기 이전율

표 1. 기초 분리 상태별 주기 이전율

T(IU)		T(IUY)		T(IY)	
1st.	2nd	1st.	2nd	1st.	2nd
0.40	0.208	0.7890	0.225	1.809	0.232
0.60	0.225	0.9080	0.228	1.863	0.232
0.80	0.231	1.0510	0.231	1.934	0.232
1.00	0.236	1.2270	0.237	2.031	0.252
1.20	0.238	1.3750	0.241	2.119	0.296
1.50	0.242	1.6430	0.253	2.293	0.370
1.80	0.245	1.9160	0.268	2.488	0.435
2.00	0.247	2.1070	0.280	2.634	0.475

지진 작용시 분리 장치는 탄성과 항복 상태를 교변하며, 구조물의 주기는 최소 $T_i(IUY)$ 에서 최대 $T_i(IY)$ 의 사이에 있게 될 것이다.

또한 분리 장치에 의한 구조물의 주기 이전 현상은 지진 하중의 중심 주기를 벗어나게 함으로써 지진에 의해 구조물에 전달되는 진동 에너지가 감소하게 된다.

그러나 제2차 고유 주기의 이전 효과는 미소하지만 이전된 제 2 주기가 지진의 중심 주기에 근

접하게 되므로, 수평 연성이 크거나 또는 과대한 고유 주기를 갖는 구조물은 고차 모드의 영향이 증가함으로 주의하여야 한다.

2.4 모드 기여율(Mode Participation Factor)

다중 모드 해석법을 이용할 경우 모드 기여율(PF)는 중요한 변수로 모드 기여율은 특정 모드의 비연계된 운동 방정식으로부터 얻어질 수 있다.

$$\ddot{Y}_i + 2\lambda_i \omega_i \dot{Y}_i + \omega_i^2 Y_i = -PF_i \ddot{u}_g(t) \quad (4)$$

$$\text{여기서 } PF_i = \frac{\{\phi_i\}^T [M] \{r\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}}$$

Y_i 는 i번째 모드의 크기, $\{r\}$ 는 변위량

λ_i, ω_i 는 등가 점성 감쇠와 주파수

$\{\phi_i\}$ 는 Mode Shape, $[M]$ 는 질량 행렬이다. 고유 주기 이전 해석에 사용된 방법과 유사한 방법으로 첫번째 모드의 기여율 변화를 검토하였다. (그림 6)와 같이 기여율은 고유 주기의 증가에 따라 비분리 탄성 상태와 기초 분리 구조에서 감소한다. 그러나 기초 분리 장치의 상태에 따른 변화율 차이는 다소 있으나, 항복후 상태의 기여율 변화는 88%에서 82%으로, 항복전 또는 탄성 상태에서는 기여율의 변화가 미소하여 분리 장치의 적용 또는 상태 변화에 따른 기여율의 변화는 미소하다.

분리 장치의 강성은 탄성 상태에서 소성 상태 또는 소성 상태에서 탄성 상태로 반복적으로 교변하므로, 실제 모드 기여율은 최소 항복전 상태(IUY)에서 최대 항복 상태(IY)에 대한 모드 기여율의 범위에 있을 것이다.

(표 2.)와 (그림 6)에서 단주기 또는 강성 하부 구조를 갖는 교량의 분리 장치에 의한 지진 거동은 상부 구조의 강체 운동 모드에 의해 지배되나, 연성 증가로 주기가 증가될수록 모드 기여율이 유사해지고 알 수 있다.

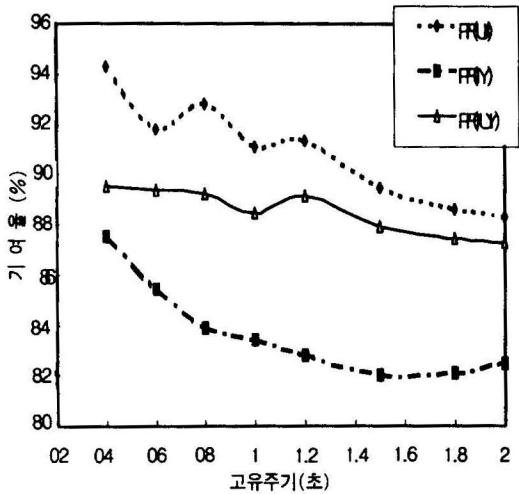


그림 6. 주기에 따른 상태별 제1모드 기여율

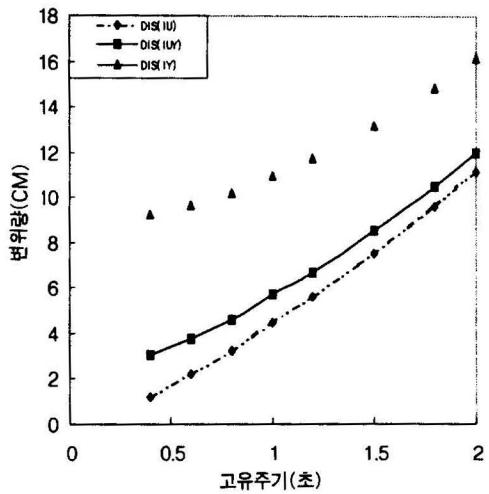


그림 7. 주기에 따른 분리장치 상태별 변위량

표 2. 주기에 따른 상태별 제1모드 기여율

고유주기 (UI) 초	기여율(UI)	기여율(IU)	기여율(IY)
0.4	94.30	89.59	87.54
0.6	91.81	89.41	85.42
0.8	92.84	89.27	83.87
1.0	91.10	88.47	82.40
1.2	91.37	88.18	82.79
1.5	89.46	87.92	82.01
1.8	88.59	87.42	82.13
2.0	88.34	87.33	82.45

2.5 고유 주기별 변위

교각 높이 변화에 의한 주기별 변위의 변화 추세를 검토하기 위해 분리 장치의 상태별 다중 모드 해석 변위를 (그림 7)과 (표 3)에 나타내었으며, 주기 증가에 따라 탄성 상태는 직선, 분리 상태에서는 곡선 증가 경향을 알 수 있다.

표 3. 주기에 따른 분리장치 상태별 변위량

고유주기 (UI) 초	변위(UI) cm	변위(IU) cm	변위(IY) cm
0.4	1.219	3.060	9.211
0.6	2.177	3.750	9.630
0.8	3.232	4.610	10.190
1.0	4.500	5.720	10.980
1.2	5.630	6.690	11.730
1.5	7.530	8.524	13.200
1.8	9.620	10.510	14.870
2.0	11.150	11.980	16.150

3. 모드 해석법의 적용성 검토

3.1 입력 지진 하중

지진 하중은 실제 파형이나 실측 파형을 조합한 시간 이력 파형과 지진파의 진동수 분포 특성 및 지반의 동적 특성이 고려된 스펙트럼으로 나눌 수 있다.

구조물의 형태가 간단하고 모드간의 구분이

명확한 구조물의 선형 해석에는 응답 스펙트럼을 이용한 방법이 효과적이나 구조물의 형태가 복잡하여 모드간의 구분이 명확하지 못하고, 연계 거동(Coupling)의 구조물이나 높은 안전성이 요구되어 비선형 안전성 검토를 필요로 하는 경우 시간 이력 해석이 필수적이다.

시간 이력 해석을 위해서는 입력 지진파의 시간 이력이 필요하며, 시간 이력파의 통계적 특성(강도, 지속 시간, 파형)은 지진의 발생 원인, 전 앙지와 피해 지역 사이의 지질학적 특성, 피해 지역의 국부적 지반 형태 등에 따라 달라진다. 그러나, 국내의 경우 계측 자료의 부족으로 설계에 사용할 수 있는 규정된 지진 파형이 없는 실정이다. 이에, 본 연구에서는 한반도의 지진 위험도 분석 결과로부터 최대 지반 가속도를 0.14G로 하고 계측 지진파의 포락 함수 및 유효 지속 시간을 분석한 인공 지진파와 설계 스펙트럼으로부터 지진파 발생 프로그램인 SIMQKE를 사용한 지진파를 비교하여 비교적 과대한 응답을 나타내는 인공지진파를 사용하기로 하였다.

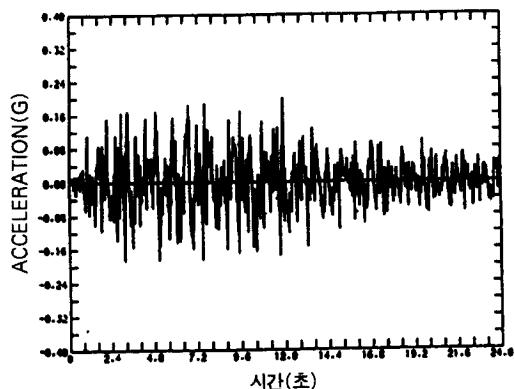


그림 8. T= 24초, 토층 형태 I의 인공지진파

인공 지진파에 의한 비선형 응답 스펙트럼을 직접적분법에 의해 감쇠비 별로 작성하였다.

(그림 10)와 같이 고유 진동 주기 1.0초에서 2.0초 구간에서 등가 감쇠비가 10% 이상인 경우

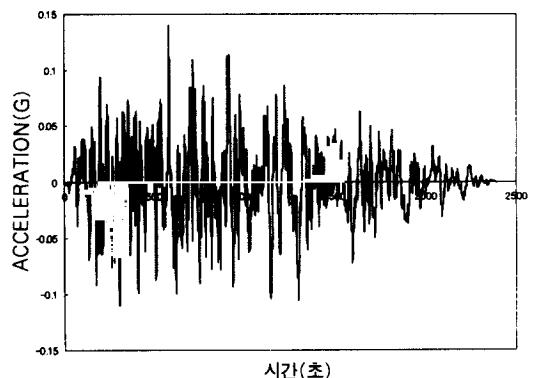


그림 9. T=24초, 토층 형태 I의 SIMQKE파

응답 스펙트럼은 비교적 선형적인 관계를 나타내었으며, 등가 감쇠비가 20% 이상인 경우 편차가 미소하였다.

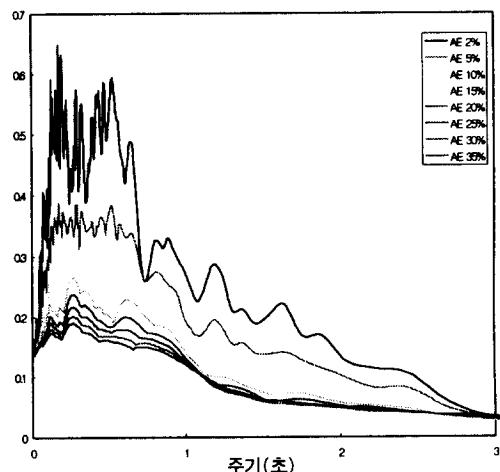


그림 10. 감쇠비에 따른 응답 스펙트럼

3.2 해석 모형

해석에 사용된 교량 모형을 (그림 11)에 나타내었다. 대상 교량은 P.C BOX교로서, 12.2m 폭을 갖는 단일 상자형으로 $40.0+8@50.0+40.0=480M$ 의 경간 구성으로 하부 구조는 직경 2.5m의 원형 단면 교각에 교각 높이를 11.0,

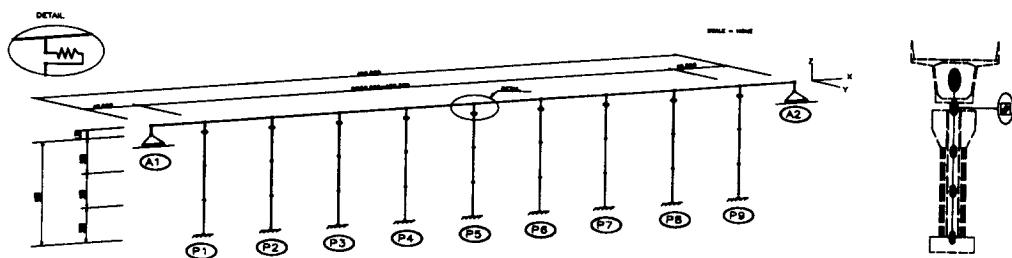


그림 11. 해석에 사용된 교량 모형

15.0, 21.0m로 변화시켜 하부 구조의 관성력을 고려하였으며, 해석의 간편화를 위해 높이 및 강성은 동일한 것으로 가정하였다.

해석은 인공 지진파에 의한 시간 이력 해석과 응답 스펙트럼에 의한 해석을 수행하였으며, 기초 분리 장치의 상태에 따라 고유 주기 및 설계력으로서 기초의 전단력 및 전도 모멘트를 검토 대상으로 하였다.

지진 응답에 대한 주기 산정은 비선형 주기는 Turkington의 주기를 사용하였으며, 모드 해석에 의한 제1번 모드의 주기와 수평 하중과 변위에 의한 유효 강성 주기를 비교하였다.

3.3 고유 주기

(그림 12)에 비분리 상태의 교각 높이 변화에 따른 변위 응답 이력을 표시하였으며, 교각 강성의 감소에 따른 주기의 변화와 완만한 이력 곡선을 나타내고 있다.

시간 이력 해석에 의한 고유 주기의 산정 방법은 정립되지 않았으나, 본 연구에서는 모드 해석법의 적용성 연구를 위하여 Turkington의 최대 응답 구간 주기 방법을 사용하였으며, 높이 변화에 따른 해석법별 주기를 검토하기 위하여 Turkington의 주기와 제 1 모드 주기 및 유효 강성(Effective Secant Stiffness)을 사용한 정적 탄성 해석 주기를 비교하였다.

검토 결과는 (표 4)와 같고, Turkington의 두 번째 방법 결과가 다소 크며, 주기 산정 방법에 따라 차이가 발생하나 전체적으로 모드 해석법 첫 번째 모드의 주기(T_{mod}), 변형 응답 시간 이력에 의한 Turkington의 제1, 제2 방법 (T_f (1,2)), 정적 탄성 해석에 의한 주기(T_{stiff})로 표시할 때 다음과 같다.

$$T_f \leq 1.0 : T_{mod} \leq T_f \leq T_{stiff}$$

$$T_f \geq 1.0 : T_{mod} \leq T_{stiff} \leq T_f \leq T_{mod}$$

또한, Turkington의 주기 산정식과 유효 강성에 의한 유효 주기 및 비감쇠 자유 진동 해석에 의한 제 1 모드 주기가 서로 유사하여 스펙트럼에 의한 적용이 가능함을 알 수 있다.

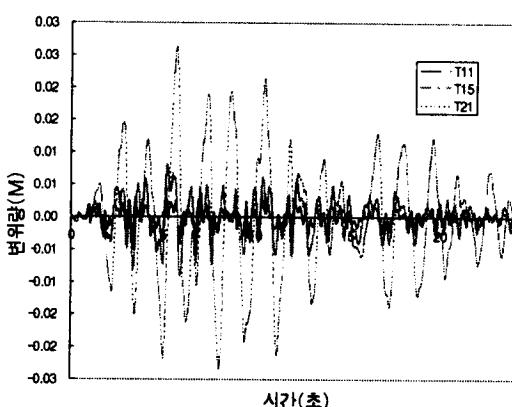


그림 12. 교각 높이별 변위 응답 이력

표 4. 높이에 따른 해석법별 주기

	질량	Tmod	T stiff	Turkington 방법			
				T _b	T _a	T _f =T _a +T _b	T _f =2T _b
T(UI) H=11M	1296.	0.3587	0.4011	0.202	0.135	0.3375	0.4040
T(UI) H=15M	1384.	0.5184	0.5606	0.259	0.238	0.4970	0.5180
T(UI) H=21M	1516	0.9946	1.1370	0.625	0.583	1.2080	1.2500

주 : Tmod : 자유 진동 해석에 의한 제 1 모드의 주기
Tstiff : 수평 하중과 변형에 의한 강성 주기

$$T_{stiff} = 2 \times \pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}}$$

T_a, T_b : 최대 응답의 전, 후 반주기

3.4 기초 전단력 및 전도 모멘트

교량 구조물의 설계력으로써 기준면의 전단력은 매우 중요한 설계력으로 취급되고 있으며, 전도 모멘트 또한 안전성과 직접적인 관계를 갖는 중요 설계 변수이다. 본 연구에서는 기초 분리 장치의 지진력에 대한 영향을 검토하기 위해 설계 기준면에서의 전단력과 전도 모멘트를 비교하였다. 교량 구조물의 주기 변화는 상부 중량을 일정하게 고정시키고 교각의 높이를 변화하는 방법을 사용하였으며, 기초의 전단력은 비분리(UI) 상태에서 고유 주기의 증가와 분리 장치의 상태 변화에 따라 감소하고, 모멘트는 증가하는 경향을 나타낸다. 해석 결과는 (그림 13)과 (표 5), (표 6)과 같다.

그러나, 하부 구조의 관성 질량의 증가를 고려하기 위한 구조물 중량에 대한 전단력 및 모멘트의 변화는 (그림 14)과 같이 비분리 상태에서는 주기 증가에 따라 전단력 및 모멘트가 감소하고, 분리 상태에서는 고유 주기의 증가와 분리 장치의 상태 변화에 따라 모멘트는 증가하고 전단력은 감소하는 경향을 나타낸다.

또한 고유 주기 1.5초 이상의 주기를 갖는 교량에서는 고유 주기의 이전 및 분리 장치의 상태

의 변화와 관계없이 전단력과 모멘트가 수렴하는 경향을 보이며, 수렴 정도는 완만하다. 이는 하부 구조의 관성 질량의 영향에 기인한 것으로 판단되며, 교각의 상부 구속 강성이 작아짐에 따라 교각의 자유 진동에 의한 고차 모드의 영향이 증가하여, 지진 하중의 주파수 특성에 따라 공명 현상이 발생할 수도 있다.

또한 비정형적 강성 교각의 전단력은 교각의 질량과 강성 및 사하중 반력에 따라 지배되며, 다양한 교각의 고유 진동 주기 및 고차 모드의 영향으로 지진의 주파수 특성에 따라 최대 전단력 및 모멘트 발생 교각이 일정하지 않았다.

표 5. 분리 장치 상태별 전단력

고유주기(UI) / 총중량(T)	전단력(UI) Ton	전단력 (IUY) Ton	전단력(IY) Ton
0.4/11945.	480.445	295.590	172.760
0.6/12534.	376.440	279.425	176.450
0.8/13039.	322.580	262.990	172.260
1.0/13544.	283.040	245.010	177.950
1.2/13914.	259.563	233.380	178.590
1.5/14504.	232.380	215.020	173.780
1.8/15042.	213.490	197.090	162.680
2.0/15396.	204.120	189.370	159.860

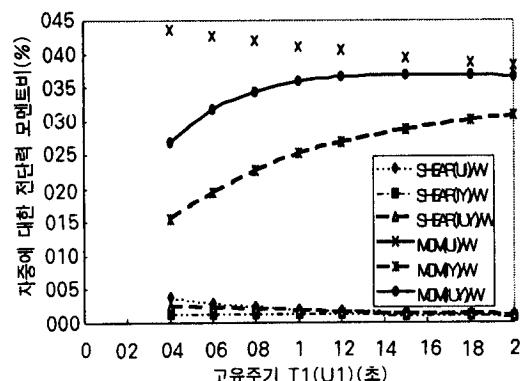


그림 13. 분리 장치 상태별 설계력

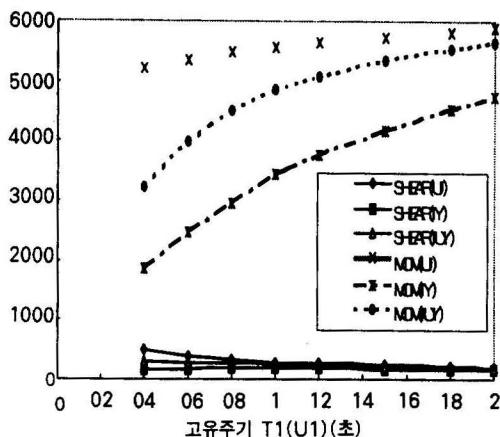


그림 14. 분리 장치 상태별 설계력/중량비

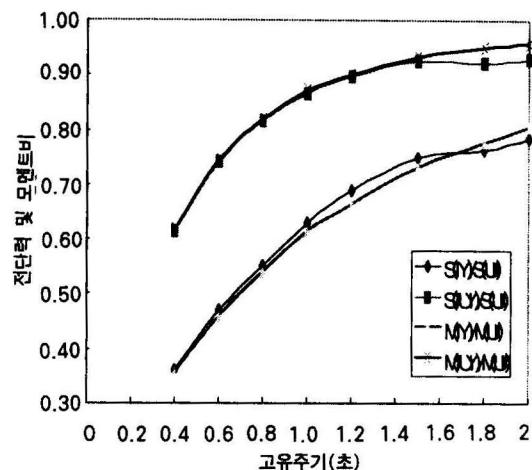


그림 15. 분리 장치 상태별 설계력 변화

표 6. 기본 주기별 전도 모멘트

고유주기 (UI)	전도모멘트 (UI) T-M	전도모멘트 (IUY) T-M	전도모멘트 (IY) T-M
0.4	5202.30	3221.91	1855.02
0.6	5345.16	3981.66	2454.34
0.8	5474.86	4487.52	2953.31
1.0	5564.30	4860.63	3426.15
1.2	5638.82	5083.64	3752.12
1.5	5723.20	5345.50	4181.88
1.8	5815.03	5531.19	4528.28
2.0	5883.15	5643.53	4740.88

4. 결과 분석

비선형 지진 응답에 대한 스펙트럼 방법의 적용성 검토를 위해 모드 기여도의 변화와 고유 주기 산정 방법, 유효 강성에 의한 주기 이동 및 설계력을 검토하였다. 또한 비분리 구조의 고유 주기 변화에 따른 분리 장치의 항복 전후 상태 변화에 대한 영향을 모드 해석법으로 비교한 결과, 분리 장치의 상태 변화에 의한 주기 이전은 고유 주기가 짧은 강성 구조에서 현저하며, 두 번째 모드에 대한 영향은 고유 주기가 1.2초 이하인 경우 미소하나, 장주기인 경우에 항복 후 상태의 주기 변화율이 2배에 달함을 알 수 있다.

또한, 분리 장치를 사용한 탄성 구조물의 모드 기여도는 비분리(UI) 상태의 고유 주기의 증가에 따라 감소하였다. 그러나, 항복전(IUY) 상태의 제1 모드 기여도는 최소 87%이며, 항복후(IY) 상태일 경우에도 82% 이상으로 제1모드가 지배적이다. 또한, Turkington의 주기 산정식과 유효 강성에 의한 유효 주기 및 비감쇠 자유 진동 해석에 의한 제 1 모드 주기가 서로 유사하여 스펙트럼 방법의 적용이 가능함을 알 수 있었다.

구조물의 유효 주기는 산정 방법에 따라 다소의 차이가 발생하나, Turkington에 의한 대표 주기를 기준으로 할 때 유사한 결과를 나타내며, 첫 번째 모드의 주기(T_{mod}), 응답 이력에 의한 Turkington의 1.2 방법 ($T_f(1,2)$), 정적 탄성 해석에 의한 주기(T_{stiff})가 방법별로 일정한 순서를 나타내며, 설계력에서도 (그림 15)와 같이 분리 장치의 상태별 전단력과 모멘트의 변화율이 일정하고, 설계력이 제 1 모드에 의해 지배되며, 분리 장치의 상태별 설계력이 수렴함을 알 수 있었다.

따라서, 결과의 분석을 요약하면 다음과 같다.

- ① 기초 분리된 교량의 지진 응답은 분리 장치의 상태 변화에 따라 지배되며, 항복전 강성에

따른 최대 설계력과 항복력 및 항복후 강성에 따른 최소 설계력의 범위에서 수렴한다.

② 분리 장치의 상태 변화는 주기 이전으로 표시될 수 있으며, 주기 이전은 지배 주기인 제1 모드 주기에서 현저하게 발생하며 고차 모드의 주기 이전 현상은 10% 이내로 미소하다.

③ 분리 장치의 상태 변화에 따른 제1 모드 기여율 검토 결과, 기여율의 변화는 항복후 상태에서 최대 6.0%로, 비선형 분리 장치에 대한 모드 해석 방법의 적용성을 확인하였다.

④ 본 연구의 결과는 지진 발생후 구조물의 비선형 거동 예측 기법에 기여할 수 있을 것이며, 분리 장치의 선정 또는 간편 설계 방법의 개발에 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Ramberg, W and Osgood, W. R., 'Descripion of Stress-Strain Curves by Three Parameters'. Nat. Advisory Comm. on Aeronautics, Technical Notes 902, 1943.
- (2) Anil. K. Chopra, Dynamics of structures . Prentice-Hall New-Jersey, 1995.
- (3) Gulkan, P., and Sozen, M. A., 'Inelastic Response of Reinforced Concrete Structures to Earthquake Motions.' Journal of the American Concrete Institute, Vol. 71, No. 12, Dec., 1974, pp 601-609.
- (4) Jennings, P.C., 'Response of a General Yielding Structure,' Journal of the Engrng. Mechanics Division, ASCE, Vol. 90, No. EM2, Proc. Paper 3871, Apr., 1964, pp. 131-166.
- (5) Banon, H.,Biggs, J.M. and Irvone, H. M., "Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames". J. St. Div., ASCE, Vol. 107, No. ST.9, 1981, pp 1713-1729
- (6) Lee. D. M.,and Medland, I. C., 'Estimation of Base Isolated Structure Responses', Bul. of NewZealand N.S.E.E, Vol.11, No. 4, 1978.

(접수일자 : 1997. 10. 24)