

# 이력 감진장치를 설치한 교량의 지진에 의한 동적 거동

Dynamic Behaviour of Bridges with Hysteretic Isolator under Seismic Acceleration

임정순\*

조재병\*\*

안영기\*\*\*

이희목\*\*\*\*

홍순진\*\*\*\*\*

Im, Jung-Soon Jo, Jae-Byung An, Young-gi Lee, Hee-Mok Hong, Soon-Jin

## Abstract

Numerical studies were carried out to investigate the mechanical properties of competent hysteretic isolators for seismic design of bridge. For dynamic analysis, bridges with isolator were simplified to a model with single degree of freedom. The initial stiffness and the yielding forces of hysteretic isolators were varied. Seismic responses obtained by time history analysis show that about 4% of the weight acting as the inertia force is appropriate for the yielding force of isolator. And also better results could be achieved with the values about two times the weight per unit displacement for the initial stiffness of isolator.

**Key words :** Seismic Design, Hysteretic Isolator

## 1. 머리말

한반도는 주변국인 일본과 중국에 비하여 상대적으로 지진 활동이 활발하지는 않으나 연평균 17회 정도 지진이 발생되며, 이 중 구조물의 피해 발생 우려가 있는 규모 5.0이상의 지진은 8~10년에 1회 정도 발생되고 있는 것으로 보고되고 있어서 중요 구조물에 대한 내진 설계가 필요한 실정이다. 교량의 경우 주요 지진 피해 형태로는

낙교, 교좌 장치 파괴, 교각의 전단 파괴 등이 있다. 이런 지진에 의한 교량의 피해를 줄이고, 경제적인 방법으로 안전성을 확보하기 위해 교량에 전달되는 지진력을 분리 장치를 이용하여 감소시키는 방안이 연구되고 있으며 실 교량에도 사용된 실적이 있다. 그러나, 현재 국내 도로교 표준 시방서에는 분리장치의 설계에 대한 규정이 없는 실정이다. 이 연구에서는 분리 장치의 역학적 특성 값을 변화시키면서 지진에 의한 교량의 동적

\* 경기대학교 건설공학부 토목공학과 교수, 정회원

\*\* 경기대학교 건설공학부 토목공학과 교수, 정회원

\*\*\* 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정, 정회원

\*\*\*\* 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\*\*\*\* 경기대학교 대학원 토목공학과 석사

● 본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2000년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

거동을 해석하고, 그 결과로부터 교량의 면진 설계에 적합한 분리 장치의 특성 값을 제시하고자 한다.

## 2. 연구방법 및 범위

지진으로 인한 수평하중이 교각을 통하여 기초로 전달되는 구조 System을 단자유도의 해석 모델로 단순화시켜 지진파에 대한 동적 해석을 수행하였다. 구조물의 감쇠비는 0.05로 가정하였고, 지진파는 도로교 표준시방서의 설계스펙트럼에 근접하는 응답스펙트럼을 얻을 수 있는 여러 지진파를 사용하였다. 해석은 동적 비선형 해석이 가능한 전산 프로그램을 사용하였다.

분리장치는 교량의 수평변위 모드에 대한 기본 진동주기를 증가시켜 응답 스펙트럼 가속도를 감소시키는 연성 기능과 지진력이 분리장치의 항복력을 초과할 경우 소성변형에 의한 에너지 소산 기능이 있다. 이 연구에서는 분리장치로 일반적으로 많이 사용되는 LRB(Lead Rubber Bearing)가 상부구조와 교각 사이에 설치된 것으로 하였다. 분리장치는 탄성 범위의 강성과 항복력으로 규정되는 완전탄성-완전소성 거동을 하는 것으로 가정하였다. 여기서 탄성 범위의 강성은 1.0m 변위에 대한 교량 자중에 해당하는 힘( $W$ )의 0.5~5.0배, 항복력은 교량 자중에 해당하는 힘( $W$ )의 0.5~10% 범위 내의 값으로 변화시키면서 검토하였다.

동적 시간이력해석 결과로부터 분리장치의 여러 특성값과 여러 지진파에 의한 각각의 최대 변형량과 연성비를 검토하여 면진 설계에 적합한 분리장치의 특성값을 제시하고자 한다.

## 3. 지진파의 선정

과거 한반도에서 발생한 실측 지진파의 자료가 미비하고, 국내 도로교 표준시방서의 내진 설계편은 AASHTO의 규정을 그대로 받아들이고 있는 실정이다. 많이 알려진 여러 지진파들은 서로 응답스펙트럼이 다르고, 또한 도로교 표준시방서에서 제시하고 있는 응답 스펙트럼 함수와도 많은 차이를 보이고 있다. 따라서 이 연구에서는 시간이력 해석법에 적용할 해석용 지진파로 이들 실측 지진파 중 응답 스펙트럼의 포락 곡선 형상이 시방서의 응답 스펙트럼 함수와 유사한 3개의 지진파를 선정하여 최대 지반가속도가 0.14g가 되도록 계수를 곱하여 사용하였다. 또한 응답 스펙트럼의 포락 곡선이 시방서의 응답 스펙트럼 함수와 좀더 근접한 3개의 인공 지진파도 사용하였다. 인공 지진파(1)은 도로교 시방서의 가속도 계수( $A = 0.14$ )와 지반계수( $S = 1.0$ )에 대한 규정에 맞도록 전산프로그램 SIMQKE<sup>5)</sup>를 이용하여 만들었고, 인공 지진파(2)와 (3)은 문헌<sup>7)</sup>의 것을 사용하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 지진파를 보여주고 있으며, Fig. 2는 이들 지진파의 응답 스펙트럼 계수를 나타내고 있다.

Table 1. 실측 지진파의 개요

지진파 명칭	최대지반가속도	최대지반변위	지속시간	발생일
Imperial Valley(1)	0.35 g	0.1086 m	53.74 초	1940. 5. 18
Imperial Valley(2)	0.21 g	0.1539 m	53.46 초	1940. 5. 18
Northridge(1)	0.60 g	0.1470 m	59.98 초	1994. 1. 17

※ 실측 지진파 자료의 출처 : NISEE, U.C. BERKELY, CALIFORNIA

Table 2. 인공 지진파(1)의 가속도 포락 함수의 형태

포락 함수	진폭 상승구간	최대진폭 지속구간	지속시간
Trapezoid Envelope Function	2.0 초	23.0 초	28.0 초

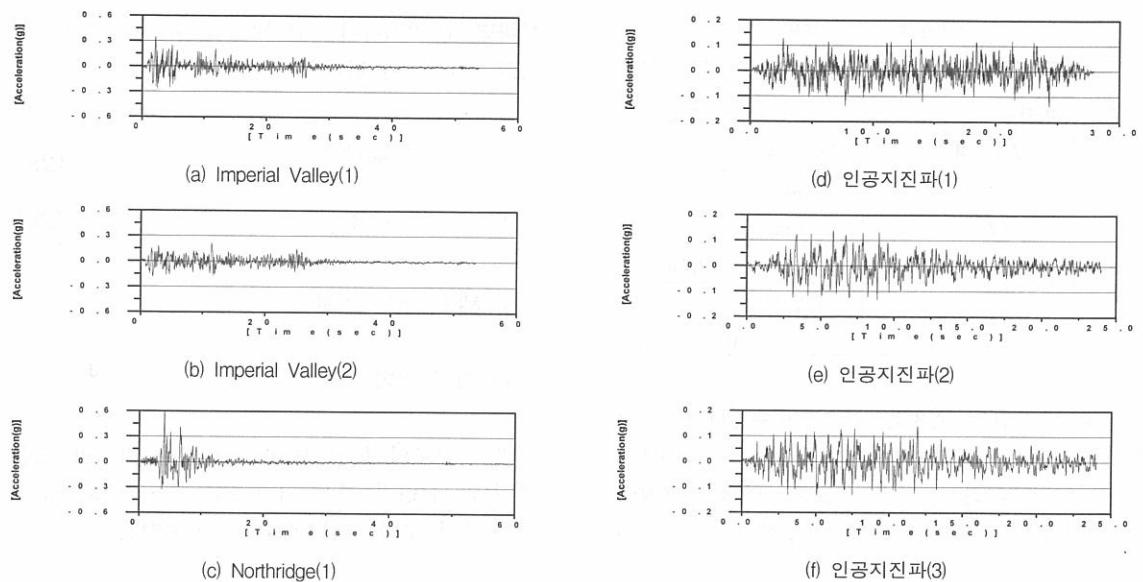


Fig. 1 사용 지진파의 지반 가속도

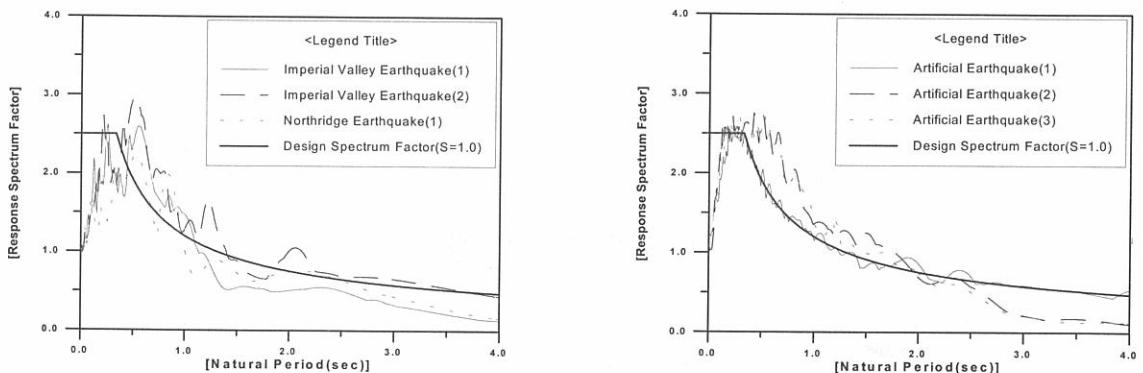


Fig. 2 사용 지진파의 응답 스펙트럼 계수

#### 4. 대상 구조물 선정

연구 대상 구조물로 철근 콘크리트 교각과 3경간 연속 강상자형 상부구조로 되어 있는 교량을 선정하였다. 대상 구조물의 특성값은 Table 3과 같다. 상부구조의 하중을 하부구조로 전달하는 교좌장치는 한 곳의 중앙 교각 위에서만 교축 방향의 수평력을 전달할 수 있도록 설계되어있으며, 다른 교각과 교대 위의 교좌장치는 움직일 수 있

는 형식으로 되어있다. 분리장치를 설치하지 않은 경우(이하 “비분리 교량”), 교량의 교축 방향 움직임에 대한 기본진동주기( $T_0$ )는 식(1)에 의해 0.4초로 계산되었다. 분리장치를 설치하는 경우(이하 “분리 교량”), 분리장치는 교축 방향의 수평력을 전달하는 교각 위에 위치하는 것으로 하였다.

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{(k_0/(W/g))}} \quad (1)$$

Table 3. 교량의 제원

상부 구조	주형	3경간 연속 강상자형.
	바닥판	철근 콘크리트 슬래브
교각	총 중량 ( $W$ )	40000 kN
	단면 2차모멘트 ( $I$ )	$4.6 m^4$
	높이 ( $H$ )	12.0 m
	탄성계수 ( $E$ )	$1.26 \times 10^8 kN/m^2$
	강성 ( $k_0$ )	$3EI/H^3$ $= 1006250.0 kN/m$

교량이 건설된 위치는 가속도계수( $A$ )가 0.14인 내진 1등급 지역이며, 지반계수( $S$ )는 1.0으로 가정하였다. 따라서, 도로교 표준시방서의 규정에 따라 식(2)에 의해 탄성 지진응답계수( $C_s$ )를 계

산하면 0.309이며, 교각이 받는 전단력( $F_0$ )은 12378.4kN 이 된다.

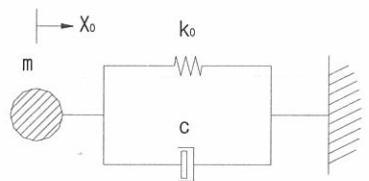
$$C_s = \frac{1.2AS}{T_0^{2/3}} \quad (2a)$$

$$F_0 = C_s \cdot W \quad (2b)$$

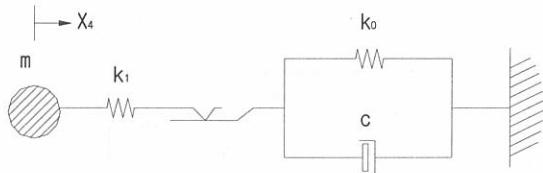
## 5. 해석 및 고찰

### 5.1 해석 방법

대상 교량의 동적 시간이력해석은 비분리 교량과 분리 교량의 경우 각각 Fig. 3a, Fig. 3b와 같은 해석 모델을 사용하여 수행하였다.



a) 비분리 교량



b) 분리 교량

Fig. 3 대상 교량의 해석 모델

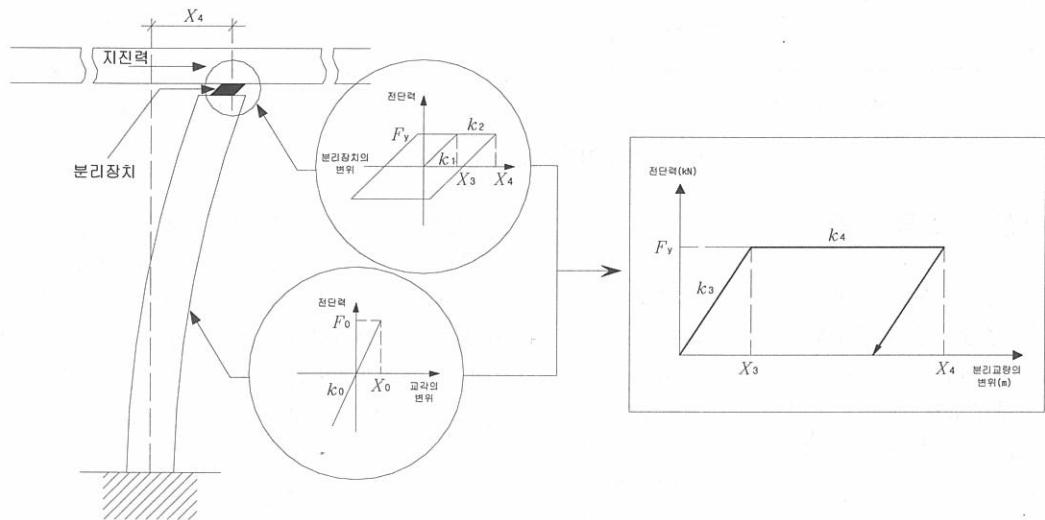


Fig. 4 교각과 분리 장치의 합성 강성

여기서,  $k_0$  : 교각의 강성,

$k_1$  : 분리장치의 항복 전 강성

$k_2$  : 분리장치의 항복 후 강성

$k_3$  : 분리 교량의 항복 전 강성

$k_4$  : 분리 교량의 항복 후 강성

$F_0$  : 비분리 교량의 기본진동주기( $T_0$ )  
에 해당하는 설계 스펙트럼에의  
한 전단력

$F_y$  : 분리장치의 항복력 (분리 교량의  
항복력은 결과적으로  $F_y$ 로 제한됨)

$F_0$  :  $F_0$ 에 해당하는 선형거동 비분리  
교량의 변위

$X_1$  : 분리장치의 항복점 변위

$X_2$  : 지진력 작용시 분리장치의 최대 변위

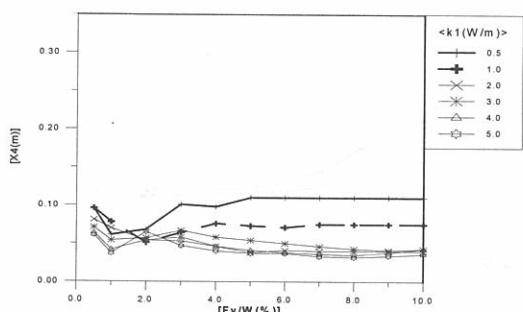
$X_3$  : 분리 교량의 항복점 변위

$X_4$  : 지진력 작용시 분리 교량의 최대 변위

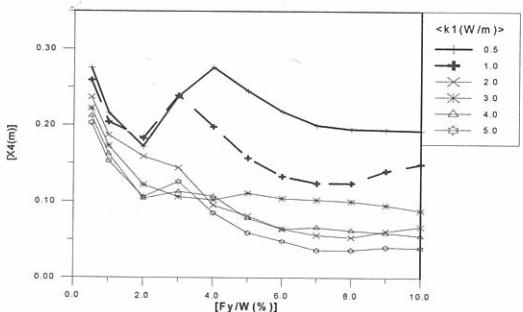
여기서 교각의 질량은 상부구조의 질량에 비하여 매우 작으므로 무시하였고, 상부구조의 질량은 하나의 질점에 있는 것으로 가정하여 결과적으로

단자유도의 진동모드가 일어나는 단순화된 해석 모델을 만들어 해석을 용이하게 하였다. 또한 분리 교량의 경우 일반적으로 분리장치는 교각에 비하여 강성이 매우 작고 항복점도 낮으므로 분리 장치를 통하여 전달되는 전단력의 범위 내에서는 교각이 탄성 거동하는 것으로 간주하였다.

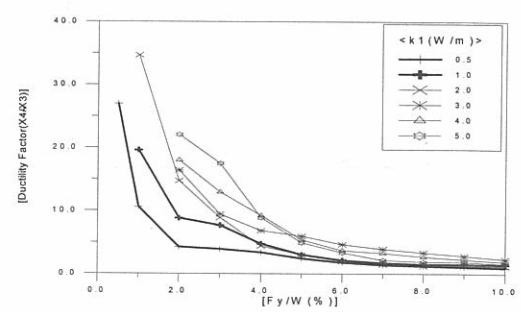
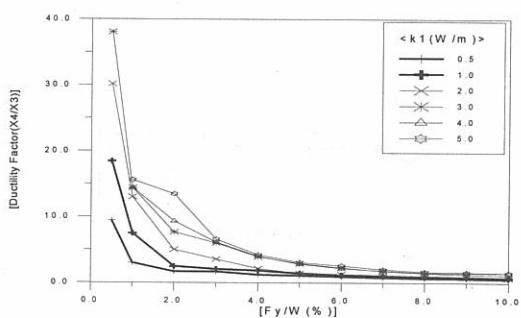
교각과 분리장치, 그리고 분리장치와 교각의 합성된 경우에 대한 하중-변위 특성 곡선은 Fig. 4와 같다. 분리장치의 항복 전 강성( $k_1$ )은 40000kN/m의 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0배로 변화시키면서 각 경우에 대해 분리장치의 항복력( $F_y$ )을  $W(40000kN)$ 의 0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10배로 하였다. 항복 후에는 분리장치의 강성이 매우 작아지므로 완전 소성거동을 하는 것으로 간주하고 분리 장치와 분리 교량의 항복 후 강성( $k_2$  및  $k_4$ )을 0으로 하였다. 해석은 직접 적분법에 의해 입력된 가속도의 시간이력에 따라 구조물의 동적 비선형 거동을 해석할 수 있는 전산 프로그램 NONLIN<sup>4)</sup>을 사용하였다.



(a) Imperial valley(1)



(b) Imperial valley(2)



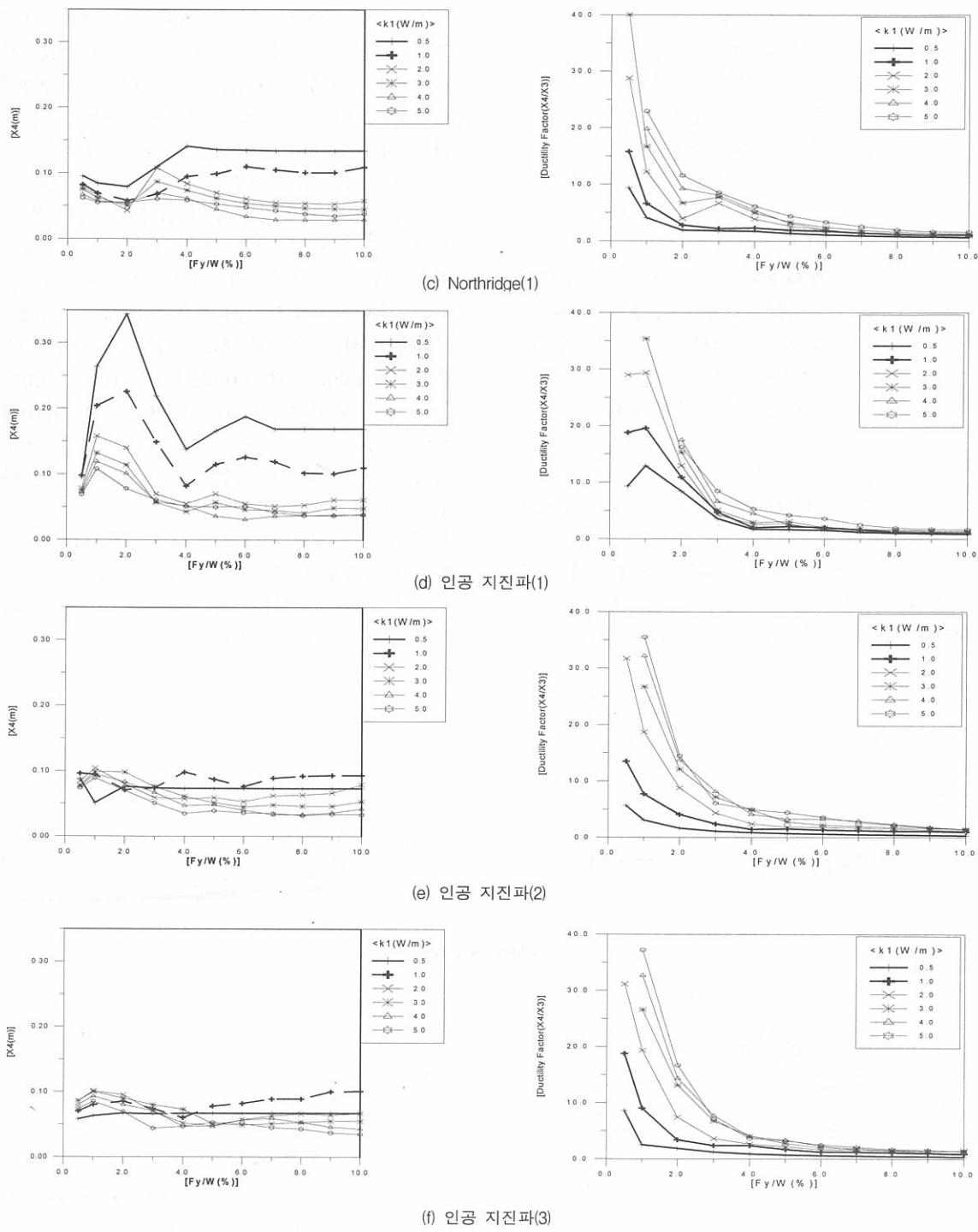


Fig. 5 항복비에 대한 최대 변위와 연성계수

## 5.2 해석 결과 및 고찰

제3절에서 선정된 각 지진파 가속도를 입력하여 동적 해석한 결과를 항복비,  $R(F_y/W)$ 에 대한 최대 변위와 연성계수( $X_4/X_3$ )를 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다.

교량의 면진설계에 사용하는 분리장치의 주 기능은 교량의 고유주기 이전과 소성변형에 의한 에너지 소산 기능을 이용하여 지진에 의한 수평력을 감소시키는데 있다. 교량의 과다한 고유주기 이전은 분리 교량의 강성을 저하시켜 평상시에도 예상치 못한 변위를 발생시킬 수 있다. 이는 교량의 사용성을 저하시킬 뿐 아니라 대부분의 지진력 감소가 고유주기 이전 기능에 의존하므로 소성변형에 의한 에너지 소산 기능을 저하시킨다. 한편, 분리장치의 항복력을 지진 수평력에 비해 너무 작게 하면 분리장치의 연성계수가 지나치게 커져 교좌장치 자체가 손상될 수 있다. 반대로 항복력이 너무 크면 소성변형에 의한 에너지 소산 기능이 저하된다. 따라서, 분리장치를 사용한 교량 설계의 주요 관건은 고유주기 이전과 소성변형에 의한 에너지 소산 작용을 잘 조합하여 교각에 발생하는 지진력을 효과적으로 감소시키는데 있다.

제3절 Fig. 2에서 실측 지진파의 응답 스펙트럼 계수는 인공 지진파의 경우와 비교해 다소 불규칙적이다. 이는 관성력으로 작용하는 교량 상판의 자중을 기준으로 한 해석에 일관성이 있는 결과를 얻기는 곤란함을 알 수 있다. 따라서, 인공 지진파의 해석 결과를 분석, 고찰하고 실측 지진파의 경우는 보조적인 비교 상대로 사용하였다. 특히, 인공 지진파(1)의 응답 스펙트럼 계수는 설계 스펙트럼 계수와 거의 일치하고 있어 해석 결과가 상당히 일관성을 가질 수 있으므로 이 지진파의 경우를 중심으로 분석, 고찰하였다.

인공 지진파(1)의 해석 결과 Fig. 5d로부터 분리장치의 강성( $k_t$ )이 0.5, 1.0일 경우  $k_t$ 이 2.0일 경우와 비교해  $R=2.0\%$  이상의 구간에서 분리 교량의 변위가 1.5~3.5배정도 크다. 이는

Imperial Valley(2)의 해석 결과 Fig. 5b에서도 유사한 결과를 보여주고 있다. 또한,  $R=2.0\%$  이하일 경우 연성계수가 급격히 증가함을 알 수 있다. 이는 다른 인공 지진파와 실측 지진파의 경우에도 동일한 결과를 보여주고 있다. 해석 결과 Fig. 5d로부터  $R=2.0\%$  초과 구간에서  $R=4.0\%$  일 경우에 분리 교량의 변위를 작게 하면서 충분한 감쇠효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또 다른 인공 지진파의 결과 Fig. 5e, 5f에서  $k_t$ 이 0.5, 1.0일 경우 Fig. 5d에서처럼 급격한 변위의 증가는 없으나 분리장치의 항복에 의한 에너지 소산 기능이 충분히 발휘되지 못하고 있음을 알 수 있다. 또한,  $k_t$ 이 0.5일 경우에  $R=4.0\%$  이상인 구간에서 지진에 의한 수평력이 분리장치의 항복력에 도달하지 못하고 있다. 이는 실측 지진파의 경우의 해석 결과 Fig. 5a, c에서도 동일한 결과를 보여주고 있다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 단일 모드가 지배적인 교량에 대해 완전탄성-완전소성 거동을 하는 분리장치를 사용하여 내진 설계를 하는 경우, 적절한 분리 장치의 특성값을 수치 해석적 방법을 통하여 검토하였다. 선정된 해석 대상 구조물과 지진파에 대한 검토 결과는 다음과 같다.

(1) 분리장치의 항복 전 강성( $k_t$ )은 약  $2.0 W/m$ 의 값이 적절한 것으로 판단된다.

(2) 분리장치의 항복력이 관성력으로 작용하는 자중( $W$ )의 4%의 값일 때 전체 교량의 변위를 작게 하면서도 충분한 감쇠효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 이 값은 비분리 교량에 대해 탄성 응답 스펙트럼법으로 구한 교각 전단력의 약 13%에 해당된다.

이 연구의 대상 교량과 다른 구조 형식 및 기본진동주기를 갖는 경우에 대해서도 추가의 검증이 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Dynamics Isolation Systems, Inc. Berkeley, CA. : AASHTO Design Procedures for Seismically Isolated Bridge, 1994
2. American Association of State Highway and Transportation Officials : AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS, 1994
3. Anil K.Chopra : Dynamics of Structures, 1995
4. Dr. Finley : NONLIN, "A Program for Earthquake Engineering", 1998
5. Depart. of Civil Eng. Massachusetts Institute of Technology : SIMQKE, "A Program for Artificial Motion Generation", 1976
6. M.J.N. Priestley : F. Seible : G.M. Calvi : Sesimic Design And Retrofit of Bridges, 1996
7. 김원배, "구조물의 동적 해석을 위한 한반도의 인공 지진과 작성", 박사학위 논문, 고려대학교, 1988
8. 도로교 표준 시방서, 건설부, 1996
9. 이 상수, "분리 장치 교량의 실용적 내진 설계 방법", 박사학위논문, 고려대학교, 1996

(접수일자 : 1999. 3. 13)