

구조물의 이단계 면진설계법

박 정 근*

(주)NSV 기술연구소 소장

1. 머리 말

면진설계는 설계지진동에 의한 지진하중, 변형량 및 응답 가속도 스펙트럼을 근사적으로 추정할 필요가 있다. 바이리니어형 면진장치를 이용한 면진구조물 설계법은 Andriano와 Carr(1991)에 의해 제안되었다. Andriano 등은 바이리니어형 면진장치를 이용한 면진구조물을 대상으로 여러 지진하중이 작용한 경우에 대해 검토하고 있다.

면진구조물의 지진응답의 추정치를 구하는 것에 의해 면진설계의 유효성을 평가 할 수가 있다. 또 면진구조물의 지진응답의 추정치를 안다면 구조물의 형상이나 면진장치의 설계변수와 단면부재의 개략설계가 가능하게 된다. 이러한 개략 설계로부터 보다 정도 높은 지진응답해석을 이용한 내진설계의 최적화나 구조물과 면진장치의 상세설계가 가능하게 된다.

바이리니어형 면진구조물의 경우는 면진장치를 탈성상태 영역과 소성상태 영역으로 나누어 생각 할 수 있으며, 각각의 상태에 따라 면진장치의 외부지진하중에 대한 역할은 분담되어있다.

각각의 영역에 대한 설계를 수행함으로써 면진교각의 최적단면을 산정하고, 소성 영역에 있어서의 면진장치의 에너지흡수능력을 극대화할 수 있는 설계법의 개발이 필요하다.

2. 면진설계법 및 설계 규정

1970년대 초반부터 다수의 지침서와 기술 기준이 면진구조물을 설계를 위하여 정비되어 왔다. 뉴질랜드에서 공공건물의 면진설계는 면진기술의 연구개발 성과를 기준으로 MWD(ministry of works and development)에 의해 수행되었다. 최근의 면진설계에서는 가속도응답스펙트럼에 의해 주어진 설계지진

력에 대해 전단력 분포를 구해 변위를 구하는 것으로 되어 있다. (Andriano와 Carr, 1991).

미국에서는 1991년 UBC(Uniform Building Code)에 면진구조물의 규정이 기술되어있다. 이것은 북캘리포니아 구조공학자 협회의 면진 소위원회에 의해 만들어진 면진설계법(안)의 1차안을 발전시킨 것이다.

뉴질랜드이 면진교량은 MWD에 의해 직접 설계되었던가, 아니면 그 감독 하에 설계되었다. 형상과 구조가 간단한 면진교량의 설계 방법은 1979년 Blakely에 의해 수행되었다. 여기서 교대는 각 2개의 등단면교각과 교대를 가졌고 지진 시에는 탄성범위에 있다고 가정하였다. Blakely의 연구성과는 뉴질랜드 칸타베리대학 토목공학과와 연구자에 의해 의욕적으로 진행되어 Kwai(1986), Moss(1986), Turkington(1987)에 의해 연구되었다.

미국에서는 면진건축물의 설계에 관한 UBC 규정과 같은 방법으로 도로교에 대한 면진설계 지침(guide specifications for seismic design of highway bridges)이 AASHTO에 의해 1991년에 만들어졌다. 납면진받침을 이용한 면진교량의 설계가 상업적으로 이루어 지고 있다. (Mayes)

일본에서는 Menshin Design이라고 하는 일본도로교의 면진설계법의 지침이 1991년 나왔고 1996년 도로교시방서에 정식으로 면진설계법이 도입되었다.

최근에는 이탈리아에서도 면진설계법 지침서가 정립된 상태이다. (Parducci, 1992)

3. 이단계 면진설계법(TSID)

3.1 배경

대략 3가지 방법으로 면진구조물의 지진설계력과 지진변위를 구할 수 있다. 첫 번째 방법은 정교한 방법으로 구조물과 면진장치가 결합된 시스템에 대하여 비선형 시간이력해석 방법에 의한 것이다. 이 방법은

* E-mail : nsvrld1@korea.com

지역의 지진도를 나타내는 지반의 시간이력에 대한 시스템의 실제 힘-변위 특성을 표현할 수 있다. 이 방법은 면진설계의 많은 시방서에서 사용되어진다. 두 번째는 가속도계수, 지반계수, 면진주기, 감쇠계수의 함수로 구성된 단순화된 공식을 이용하는 방법이다. 이 방법은 정교한 방법의 추정보다 큰 값을 나타낸다. 마지막 방법으로는 등가선형방법을 이용하는 것이다.

첫 번째 방법은 설계자에게 동해석의 복잡함과 시간이 많이 걸리는 단점이 있고, 두 번째 방법은 아주 단순한 공식을 이용하므로 인해 어떤 특별한 경우의 타입의 면진장치에만 적용할 수 있어 일반적이지 않다고 할 수 있다. 마지막 세 번째 방법은 설계지진력과 변위를 구하기 위해 감쇠보정계수를 사용하여 비선형 상태의 구조물 동적 응답을 추정하는 것으로 다양한 형태의 바이리니어 면진구조물의 응답추정에 이용된다.

그러나 실제에 있어서는 비선형성이 강한 면진구조물을 실제 동해석을 통해서 설계한다면 비경제적일 것이고 아주 단순화된 식을 사용하면 적용성과 정확성에 문제가 될 것이다. 따라서 등가선형 방법은 이러한 두 극단적 방법의 중간형태를 취한 것으로 면진 구조물의 설계변위 추정에 적합한 방법이라 볼 수 있다.

이러한 등가선형 방법에서는 비선형 이력곡선을 선형유효강성과 응답의 감쇠보정계수로 단순화시켜 이상화 하고 있다. 여기서 감쇠보정계수는 비선형상태의 응답을 보정하기 위해 사용되어지며 몇 가지 식이 제안되어 설계에 이용되어지고 있다.

이 전에 제안된 식들은 선형시스템과 점성감쇠 그리고 선형 응답 스펙트럼을 사용하여 식 (1)과 같은 방법으로 구하였다.

$$C_D(h_{eq}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{S(T_i, h)}{S(T_i, h_c)} \quad (1)$$

여기서, 선형시스템 $S(T_i, h)$ 는 주기 T_i 와 감쇠비 h 를 가진 선형응답스펙트럼이고, $S(T_i, h_c)$ 는 주기 T_i 와 일정한 감쇠비(보통 비감쇠 혹은 0.05를 사용) h_c 를 가진 선형응답스펙트럼이다.

그러나, 이 식은 선형시스템을 고려한 것으로서 여러 형태의 바이리니어형 면진시스템을 표현할 수 없다. 따라서 다양한 형태의 비선형 면진시스템과 지진 특성을 고려 할 수 있는 비선형 감쇠보정계수의 제

안이 필요하다.

식 (2)와 (3)은 일본 건축학회에서 제안한 식으로서 면진구조물의 응답추정에 이용되고 있다.

$$C_D(h_{eq}) = \frac{1}{\sqrt{30h_{eq} + 1}} (h_{eq} < 0.1) \quad (2)$$

$$C_D(h_{eq}) = \frac{1}{\sqrt{10h_{eq} + 3}} (h_{eq} \geq 0.1) \quad (3)$$

이 식들은 제한된 지진파형과 지반의 종류를 고려하지 않았고, 선형시스템을 이용하여 만들어 졌으며 감쇠비가 0.1을 기준으로 두 가지 식들로 구성되어있다.

식 (4)는 1984년 일본 동경공업대학의 K. Kawasima 교수가 제안한 식으로서 일본도로교 시방서에 수록되어 있으며, 직접 면진설계단계에서는 이용되지 않고 설계된 면진구조물을 검사하는데 사용되어진다. 선형가속도 스펙트럼과 함께 높은 감쇠를 가진 구조물의 응답해석을 위해 적용되어진다.

$$C_D(h_{eq}) = \frac{1.5}{40h_{eq} + 1} + 0.5 \quad (4)$$

이 식은 일본도로교시방서의 면진설계편의 감쇠보정계수와 미국의 AASHTO시방서의 감쇠보정계수 B에 영향을 준 유명한 식이나, 제한된 지진파형과 구조물의 비선형성이 고려되지 않아 응답추정의 정도가 좋지 못하다.

식 (5)~(8)은 일본도로교시방서의 면진설계편에 있는 감쇠보정계수로서 등가감쇠에 따라 크게 4구간으로 나누어져 있고, 일정한 값을 가지고 있다.

이들 일정값은 식 (4)의 그래프 선상에 놓여 있다.

$$C_D(h_{eq}) = 1.0 (h_{eq} < 0.1) \quad (5)$$

$$C_D(h_{eq}) = 0.9 (0.1 \leq h_{eq} < 0.12) \quad (6)$$

$$C_D(h_{eq}) = 0.8 (0.12 \leq h_{eq} < 0.15) \quad (7)$$

$$C_D(h_{eq}) = 0.7 (h_{eq} \geq 0.15) \quad (8)$$

미국 AASHTO시방서에서는 식 (9)~(11)에서 보는 바와 같이, 등가감쇠비가 3가지 경우에 대해 감쇠보정계수 B를 규정하고 있으며 중간 값은 선형 보간하여 사용한다.

$$h_{eq} 0.1 ; B = 0.83 \quad (9)$$

$$h_{eq} 0.2 ; B = 0.67 \quad (10)$$

$$h_{eq} 0.3 ; B = 0.59 \quad (11)$$

그러나 이러한 보정식들은 선형시스템을 사용하고 있고 지진파형도 극히 제한된 것을 사용하여 만들어진 것들로서 면진구조물의 응답추정에 있어 과대한 응답을 추정하고 있다. 그림 1~3은 이 들식을 사용한 응답추정정도를 보여준 것으로 과대하게 추정되고 있음을 보여주고 있다.

가로 축은 면진장치의 탄성영역에 관련된 주기고 세로축은 이들 감쇠보정계수를 사용한 등가선형방법으로 추정된 응답에 대한 비선형 해석을 통한 응답의 비로서 1인 경우 정확히 추정된 것이고 1보다 작을 경우는 적게 추정된 것이 된다. 여기에 사용된 지진파는 EL Centro NS 1940이고 456개의 면진 모델을 사용하고 있다. 456 면진모델은 대부분의 바이리니어형 면진장치를 표현할 수 있는 범위이다.

그림 1~3에서 이 전의 제안된 감쇠 보정계수를 이용한 면진구조물의 응답추정 정도를 보면, 아주 과대한 응답추정을 하고 있거나, 실제변위보다 적은 응답을 추정하는 경우도 있어 면진구조물의 응답을 보다 정확히 추정할 수 있는 적절한 감쇠 보정계수 식의 개발이 필요하다.

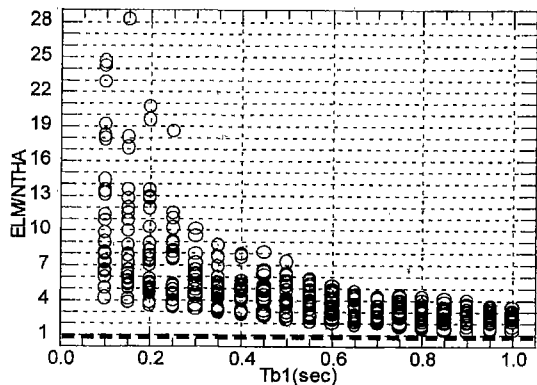


그림 1 일본도로교시방서의 식을 이용한 응답추정

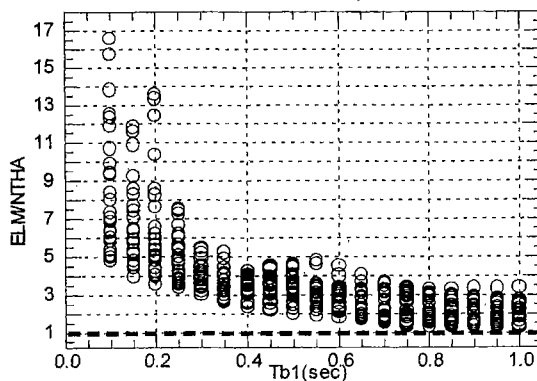


그림 2 K. Kawasima가 제안한 식을 이용한 응답추정

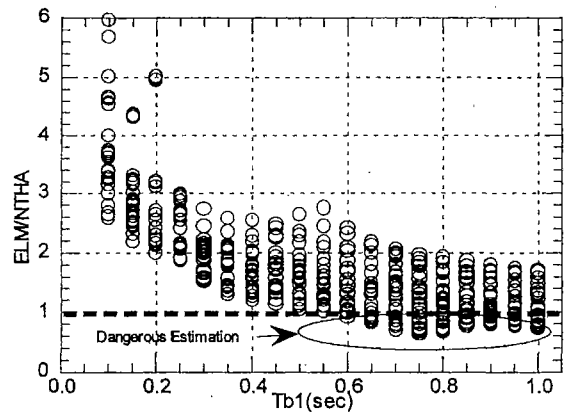


그림 3 일본건축학회의 식을 이용한 응답추정

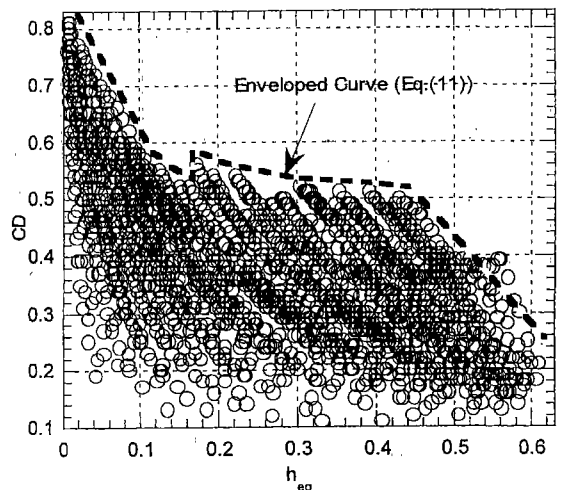


그림 4 등가감쇠비-비선형감쇠보정치

요구되는 개발식은 식 (12)에서와 같이 다양한 형태의 지진과 면진모델에 대해서 비선형 해석과 등가선형해석 방법을 비교하여 개발하였다.⁽¹⁾ 개발식은 두 가지 종류를 제안했는데 첫째, 상세한 식으로 파형의 종류, 항복비, 면진장치의 탄성관련주기를 알면 90% 이상 정확하게 추정 가능한 식이다. 둘째는, 단순화된 식으로 등가감쇠계수의 향으로 구성되어 있다. 단순화된 식을 구하기 위한 해석결과는 그림 4와 같으며 등가감쇠비의 변화에 따른 보정값을 보여주고 있다. 등가감쇠비가 0.17와 0.43을 기준으로 식 (12)~(14)로 표현되어 진다. 이 제안된 식의 응답추정정도는 일본도로교시방서나 Kawasima식보다는 월등히 잘 예측하고 있다.⁽¹⁾ 제안된 식은 일본건축학회식과 비슷하나 일본건축학회의 추정치는 탄성주기가 0.6초 이상의 구간에서 적은 값을 보여주고 있는데, 이는 변위가 많이 발생되어 교대 등 인접구조물과의 충돌 등을 발생시켜 구조물에 악영향을 줄 수 있는 위험

한 예측 혹은 설계로 이어질 수 있다.

$$C_D(h_{eq}) = \frac{0.825}{\sqrt{9.2h_{eq} + 1}} \quad (12)$$

$(h_{eq} \leq 0.17)$

$$C_D(h_{eq}) = \frac{0.616}{\sqrt{1.346h_{eq} + 1}} \quad (13)$$

$(0.17 < h_{eq} \leq 0.43)$

$$C_D(h_{eq}) = \frac{0.616}{\sqrt{1.346h_{eq} + 1}} \quad (14)$$

$(h_{eq} > 0.43)$

그 다음 중요한 것이 면진장치가 외부의 지진 에너지를 최대한 흡수 할 수 있는 조건을 부여하는 것이다. 면진장치는 그림 5에서 보는 바와 같이 탄성강성, 소성강성, 항복력의 3개 변수가 지배적이다. 이들 매개변수 중 내진성능 즉, 외부에너지 흡수 능력과 직접적으로 관련 있는 것이 여러 경우의 시뮬레이션을 통하여 항복력이라는 것을 알아냈고 지진의 크기에 거의 비례하여 증가한다는 사실을 밝혀 냈다.

각 지진크기별 최적항복비를 설계식으로서 표현할 수 있다면, 설계자는 면진설계시 장치의 항복비를

쉽게 정할 수 있을 것이다. 이러한 최적의 항복비를 정하기 위하여 총 7,308경우에 대하여 해석을 실시했다. 해석결과는 그림 6에 표시했다. 식 (15), (16)은 이들 해석의 결과를 근거로 만들어진 것으로 면진장치의 최적항복비식을 나타내고 있다.

$$OYR = 0.0011 + 0.122EG \quad (EG < 1.05) \quad (15)$$

$$OYR = 0.07 + 0.057EG \quad (EG \geq 1.05) \quad (16)$$

3.2 이단계 면진설계(TSID) 흐름도

이단계 면진설계법, TSID(Two-step Seismic Isolation Design for Highway Bridges)은 3.1절에서 설명한 바와 같이 좀 더 정확한 면진구조물의 응답 예측과 면진구조물의 내진성능 확보 즉, 장치에 의한 외부지진에너지 흡수의 극대화를 위해 제안된 설계식을 이용하여 면진장치의 탄성영역(1단계)과 소성영역(2단계)에서 독립적으로 설계를 수행함으로써 설계의 효율성과 각 영역에서의 하중상태별 구조단면의 경제적 결정과 효율적인 면진장치 설계를 수행할 수 있다.

그림 7은 TSID의 설계흐름도를 보여 주고 있다.

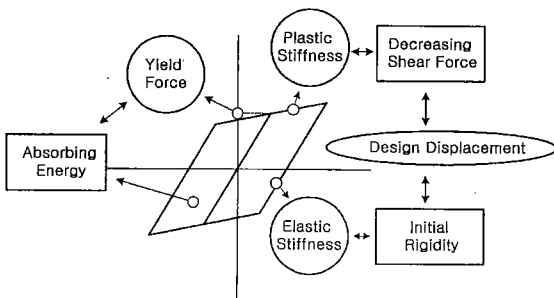


그림 5 바이리니어형 면진장치의 주요매개변수

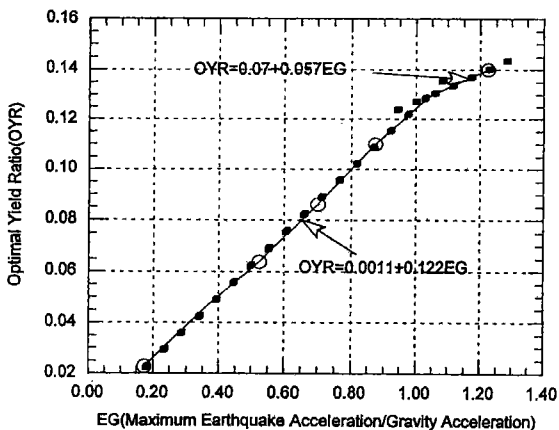


그림 6 지진력-최적항복비

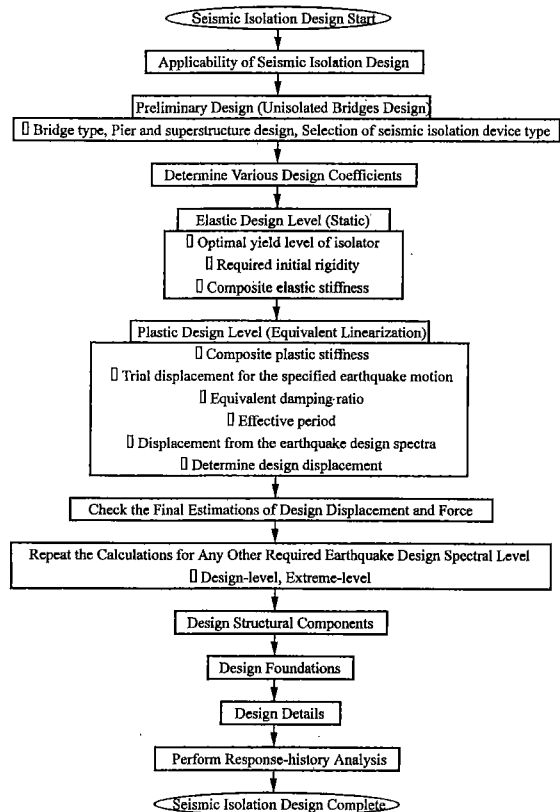


그림 7 TSID 설계 흐름도

3.3 TSID를 위한 예비설계단계

TSID는 면진설계에 앞서 예비설계가 이루어진다. 본 단계에서, 상부구조와 교각의 연결부는 수직, 수평의 상시사용하중에 대해 교각이 저항한다는 조건에서 설계가 이루어진다. 이것은 면진교량의 경우 하부로 전달되는 하중이 전 교각이 부담하게 되어있고 면진교각의 최소한의 단면은 상시 수평하중과 수직하중을 견디어 낼 수 있어야 한다는 조건에서 출발한다. 설계수평하중으로는 제동하중, 바람하중 등을 들 수 있다. 또한 상부구조와 하부구조의 형태, 시간 수, 교각의 높이 등이 결정되어 진다. 상부구조의 질량을 하부구조에 분산시키기 위해 강성의존하중분산계수를 정의하여 사용하였다. 강성의존하중분산계수는 식 (17)과 같이 전체 교각의 강성에 대한 해당교각의 강성 비로서 정의한다.

$$(\kappa_u)_i = \frac{(K_u)_i}{\sum (K_u)_i} \quad (17)$$

3.4 탄성설계단계

탄성설계단계에서부터는 면진설계이며 상부구조와 하부구조는 바이리니어형 면진장치로서 연결되어 있다. 이 상태에서 면진장치는 완전한 고정은 아니지만 상시하중에 대해 허용하는 미소변위를 발생시키면서 미끄러진다. 이때의 수평방향하중은 상부구조로부터 전달되는 하중의 크기에 비례한다고 가정, 마찰의존하중분산계수를 정의하여 각 하부구조에 수평력을 작용시킨다. 마찰의존하중분산계수는 식 (18)과 같이 전체 수직하중의 합에 대한 해당 지지 점의 반력의 비로서 정의한다.

$$(\kappa_l)_i = \frac{(V_R)_i}{\sum (V_R)_i} \quad (18)$$

여기서는 식 (15), (16)을 이용한 면진장치의 최적 항복비를 결정하며 식 (19), (20)을 이용하여 면진장치에 작용하는 전체 항복력 (F_{ly})과 하중분산계수를 이용하여 각 지점에 있어서의 면진장치의 항복력 ($(Q_y)_i$)을 계산한다. 또한, 면진장치에 작용하는 전체 항복력은 수평상시하중보다는 커야한다.

$$F_{ly} + OYR \times W_s > L_{fs} \quad (19)$$

$$(Q_y)_i = (\kappa_l)_i F_{ly} \quad (20)$$

각 지지점에서의 복합탄성강성은 식 (21)로 계산

되어 진다.

$$(K_{ce})_i = \frac{(Q_y)_i}{D_e} = \frac{(K_p)_i (K_{bl})_i}{\{(K_p)_i + (K_{bl})_i\}} \quad (21)$$

여기서, D_e 는 설계자의 판단에 의한 허용변위 또는 규정되어 있는 허용탄성설계 변위이다. 각 지지점에서의 면진장치의 탄성강성은 식 (22)와 같다.

$$(K_{bl})_i = \frac{(K_p)_i (K_{ce})_i}{\{(K_p)_i + (K_{ce})_i\}} \quad (22)$$

면진교량의 탄성상태주기는 식 (23)으로 계산되어진다.

$$P_{be} = 2\pi \left(\frac{M_s}{\sum (K_{ce})_i} \right) \quad (23)$$

3.5 소성설계단계

소성설계단계부터 본격적인 지진하중에 대해 설계가 이루어지며 등가선형해석 방법과 제안된 비선형 감쇠보정계수를 이용하여 설계지진변위, 설계지진력이 산정된다.

본 설계단계에서 가장 먼저 이루어지는 것이 요구되는 수평전단력과 변위를 고려한 목표소성주기 (T_{op})를 설정하는 것이다. 목표소성주기는 식 (24)에 의해 계산된다.

$$(K_{bl})_{total} = \frac{4\pi^2 M_s}{T_{op}^2} \quad (24)$$

여기서, 면진장치의 외부지진에너지의 흡수력은 최대로 이루어 진다. 또한 최소한 요구되어지는 허용설계지진변위와 지진력을 목표주기와 관련하여 조정되어 진다.

각 지지 점에서의 면진장치의 소성강성은 식 (25)와 같다.

$$(K_{bl})_i = (K_{bl})_{total} (\kappa_l)_i \quad (25)$$

교량의 복합소성강성은 식 (26)과 같다.

$$(K_{cp})_i = \frac{(K_{bl})_i (K_p)_i}{\{(K_{bl})_i + (K_p)_i\}} \quad (26)$$

면진교량의 소성상태주기는 식 (27)로 계산되어진다.

$$P_{bp} = 2\pi \left(\frac{M_s}{\sum (K_{cp})_i} \right)^{1/2} \quad (27)$$

4. 맺 음 말

본 원고는 도로교를 위한 새로운 면진설계법을 제안한 것으로서 경제적이고 효율적인 면진교량의 단면 결정과 절차를 정립한 것이다.

이단계 면진설계법(TSID)은 면진교량에 대한 정밀 제어설계가 가능하고 개발된 식을 사용하는 것에 의한 내진성의 정량적 확보와 설계초기 단계에서 면진구조물의 설계변위를 다른 어느 방법보다 정확히 추정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 설계 방법은 면진장치가 최대의 에너지 흡수를 할 수 있는 설계식을 제안하는 것에 의하여 내진성을 정량적으로 확보 할 수 있다는 것이 가장 큰 성

과이며 한국형 설계스펙트럼의 개발과 세부적 설계 항목에 대한 연구가 이루어진다면 한국형 면진설계법의 개발로 연결될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Jeung-geun Park and Hisanori Otsuka, 1999, "Damping-dependent Coefficients for Maximum Response Estimation of Isolated Structures", JSCE.
- (2) Jeung-geun Park and Hisanori Otsuka, 1999, "Optimal Yield Level of Bilinear Seismic Isolation Devices", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, John Wiley & Sons.