大韓土木學會論文集
第12卷 第4-1號 · 1992年 12月
pp. 9~21

構 造 工 學

주구조물 및 부구조물에 대한 감진장치의 지진응답 감소 효율성

Effectiveness of Isolation-System on Reduction of Seismic Response of Primary and Secondary Structures

金永上* · 李東根**
Kim, Young Sang · Lee, Dong Guen

Abstract

The effectiveness of the isolation system installed at the base of the primary structure and at the support of the substructure mounted on the primary structure is evaluated for reducing of structural responses under different earthquakes in this paper. The structural responses are analyzed to identify its behavior due to the input motion characteristics such as various peak acceleration and frequency content. Three analytical models are used to evaluate the effectiveness of the isolation system in this study as follows: fixed-base primary structure with support-fixed substructure, base-isolated primary structure with support-fixed substructure, and fixed-base primary structure with support-isolated substructure. A computer code (KBISAP) is used for numerical integration of equation of motion considering the interaction between the primary structure and the secondary structure. The matrix condensation technique and constant average acceleration method are utilized in this program. And also, the effective stiffness of the base-isolator on reducing the structural response are evaluated for various earthquakes through the relationship of the acceleration - displacement.

요 지

논문에서는 주구조물의 기초와 부구조물의 지지점에 설치된 감진장치가 구조물의 지진응답 감소에 미치는 영향을 분석하였다. 여러가지 지진하중의 특성에 따른 감진장치가 설치된 주구조물과 부구조물의 거동을 비교분석하였으며, 이때 사용된 해석모델은 고정기초 구조물에 지지점이 고정된 부구조물, 감진기초 구조물에 지지점이 고정된 부구조물, 고정기초 구조물에 지지점 감진장치가 설치된 부구조물과 같은 세가지이다. 부구조물의 응답계산에서는 주구조물과 부구조물의 상호작용을 고려하였다. 계산에 사용한 수치적분방법은 constant average acceleration 방법이며, 이 방법과 축소행렬방법을 이용한 전산프로그램(KBISAP)을 사용하였다. 또한 지진하중에 대한 구조물의 지면에 대한 상대변위를 제한시키기 위하여 여러가지 지진하중에 대한 구조물의 가속도와 변위의 상관관계를 계산하여 감진장치의 적합한 수평강성을 분석하였다.

* 정회원 · 한국원자력안전기술원 안전심사부 토목구조실 선임연구원
** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 부교수

1. 서 론

일반적으로 안전성이 가장 중요한 원자력 관련 시설등의 설계에서 지진은 주요 설계하중의 하나이다. 최근에는 국내에서도 구조물의 내진설계기술능력이 많이 향상되었으며, 일반건물에도 내진설계기준의 적용이 법제화되었다.[1] 일반적인 구조물 설계는 부재의 크기를 적절하게 증가시켜 작용하중에 저항하도록 하고 있으나,[2,3] 강성이 증가된 구조물에 지진하중이 작용하게되면 구조물의 응답은 크게 증가되는 수가 많다. 특히 안전성 관련 부구조물, 기기 및 부품등이 구조물 내의 상부에 위치하게 되면 주구조물의 설계특성에 따라 그 응답은 크게 증폭된다. 일반적으로 주구조물 내에 설치된 주요 부품 및 기기는 시설의 운전 및 통제에 직접 관련되므로 지진 발생시 그 안전성 유지는 구조물의 건전성 유지보다도 더 중요할 수 있다. 또한 부계통은 대체적으로 복잡하게 구성되어 있어 해석 및 설계가 어려울 뿐 아니라 고유진동수가 주구조물의 진동수와 근접하게 되는 경우가 많다. 이러한 경우 부구조물에 공진현상이 발생되어 지진응답은 매우 커지게 되므로 안전성 확보에 문제가 된다.[3]

감진기초 구조물의 기본원리는 구조물에 감진장치를 설치함으로써 구조물의 고유진동수를 지진하중의 주진동수와 분리시켜 지반으로 부터 구조물에 전달되는 지진하중을 감소시키는 것이다.[4,5]

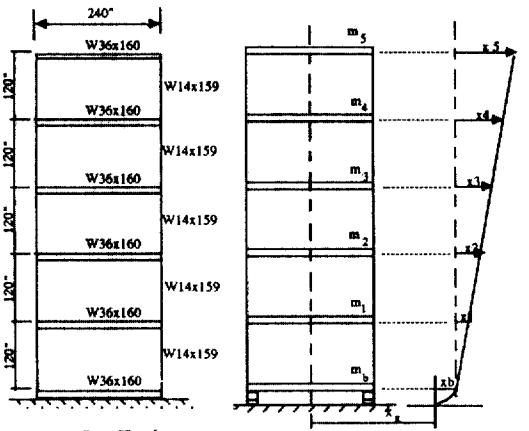
여러 종류의 감진장치가 제안된 것은 오래되었지만,[6] 최근에서야 실험적 입증방법을 통하여 해석이론이 어느정도 정립되어 실제 구조물에 적용되고 있으며, 연구활동도 활발히 진행되고 있다. 여러가지의 감진장치에 대한 적용성 및 장단점은 Kelly[7]에 의해 분석되었다.

여러가지 감진장치 중에서 Laminated Rubber Bearing(LRB) 감진장치가 가장 널리 사용되고 있으며,[8,9] LRB 감진장치는 유연성이 높은 고무판과 강성이 큰 강판의 여러 겹으로 구성되어 있기 때문에 구조물의 사하중 지지에는 수직강성이 높아 유리하고 구조물에 가장 영향을 많이 미치는 지진하중의 수평성분에 대해서는 유연성이 높아 그 응답을 감소시키는 효과가 있다. 따라서 본 논문에서는 LRB 형식의 감진장치를 채택하여 구조해석을 수행하였다.

본 논문에서는 주구조물의 기초 및 부구조물의 지지점에 설치된 감진장치의 지진하중에 대한 구조물의 응답감소 효율성을 분석하였으며, 해석에 사용된 해석모델은 (i) 고정지반 구조물상의 고정지지점을 갖는 부구조물, (ii) 감진기초 구조물상의 지지점이 고정된 부구조물, (iii) 고정기초 구조물상의 지지점이 감진된 부구조물과 같은 세가지형태이다. 또한 감진장치가 주구조물의 응답감소에 미치는 영향을 분석하기 위하여 부구조물이 설치되지 않은 고정기초 구조물 및 감진기초 구조물의 두가지 경우에 대해서도 해석을 수행한 결과를 비교하였다. 주구조물은 5층 강재뼈대 구조물로 구성되었으며, 부구조물은 지진하중에 대해 가장 큰 응답을 구하기 위하여 5층에 위치한 것으로 가정하였다. 구조물의 응답감소에 가장 효율적인 감진장치의 수평강성을 구하기 위하여 지진하중특성, 즉 지진의 규모, 진동수 특성, 지진의 지속시간등이 서로 상이한 1940년 El Centro, 1952년 Taft, 1985년 Mexico, 1971년 Pacoima Dam지진에 대해 감진장치의 수평강성 변화에 따른 구조물 5층의 지반에 대한 상대변위 및 절대가속도를 계산하고 그 상관관계를 분석하였다. 또한 상기에 기술된 네가지의 지진하중에 대하여 구조물의 5층 및 5층에 설치된 부구조물의 상대변위 및 절대가속도를 계산하여 감진장치의 지진하중에 대한 구조물 응답감소 효율성을 비교 분석하였다. 이때 사용된 해석방법, 해석모델, 운동방정식 및 전산프로그램(KBISAP)은 "감진장치 지지부가 설치된 기기의 내진해석"[10]에서 개발된 것을 이용하였으며, 이를 다음 2절과 3절에서 간략하게 기술한다.

2. 해석모델

주구조물에 대한 감진장치의 지진응답 감소 효율성을 평가하기 위하여 선정한 전형적인 해석모델은 그림 1(a)와 같은 고정지반 구조물(구조물 A) 및 그림 1(b)에 제시한 것과 같은 감진기초 구조물(구조물 B)이며, 감진기초 구조물은 주구조물과 감진장치로 구성되어 있다. 본 논문에서 채택한 주구조물의 부재 제원은 그림1(a)에 제시하였으며, 해석에 사용된 모든 계통의 주구조물 제원은 이와 동일한 것으로 가정하였다. 주구조물 내에 위치하는 부구조물은 주구조물의 지진응답이 가장 큰 5층에 위



(a) 구조물 A (b) 구조물 B

그림 1. 전형적인 구조물 해석모델

치한 것으로 가정하였다. 지지부에 설치된 감진장치의 지진하중에 대한 부구조물 응답 감소 효율성을 분석하기 위하여 세가지 해석모델을 선정하였다. 즉 구조물 A상의 지지부가 고정된 부구조물(구조물 C), 구조물B상의 지지부가 고정된 부구조물(구조물 D), 구조물 A상의 지지부에 감진장치가 설치된 부구조물(구조물 E)이다. 부구조물의 질량은 부구조물-지지층 사이의 상호작용 영향[11]을 고려하여 층 질량의 1/10로 가정하였다. 부구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬은 주구조물의 해당되는 행렬에 추가하여 부구조물-지지층 상호작용을 고려하였다. 본 논문에서 채택한 감진장치는 가장 일반적이고 널리 사용되고 있는 LRB형식이며 그림1(b)에 보인 것과 같이 지반과 기초슬래브 사이에 위치하며 수직방향으로의 강성은 커서 구조물의 사하중을 충분히 지지하는 반면 수평방향으로의 강성은 수직강성에 비해 매우 작아서 지진하중 작용시 구조물에 전달되는 지진하중을 감소시키는데 효과적이다.

3. 운동방정식

그림 1(b)에 보인 것과 같이 수평강성 k_b, 감쇠비 c_b, 구조물 기초슬래브의 질량 m_b로 구성된 감진기초 구조물에 대한 운동방정식은 식 (1) 및 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$[M](\{\ddot{u}\}+\ddot{x}_g\{I\})+[C]\{\dot{X}\}+[K]\{X\}=\{0\} \quad (1)$$

$$m_b(\ddot{x}_b+\ddot{x}_g)+c_b\dot{x}_b+k_bx_b=-\sum_{i=1}^{n} m_i(\ddot{u}_i+\ddot{x}_g) \quad (2)$$

여기서, [M], [C], [K]는 각각 주구조물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬을 나타내며, $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$는 각각 주구조물의 가속도, 속도, 변위를 표시한다. 또 $\ddot{x}_g$는 지반가속도이다. 위의 식 (2)에서 $\{\ddot{u}\}$는 지반에 대한 각층에서의 상대가속도이며, $\ddot{x}_b$, $\dot{x}_b$, x_b는 지반에 대한 기초슬래브의 상대가속도, 상대속도, 상대변위이다.

위의 두 식 (1)과 (2)를 행렬식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix}[M] & 0\\ 0 & m_b\end{pmatrix}\begin{Bmatrix}\{\ddot{u}\}\\ \ddot{x}_b\end{Bmatrix}+\begin{pmatrix}[C] & -\langle C\rangle\{I\}\\ -\{I\}^T[C] & c_b+\{I\}^T[C]\{I\}\end{pmatrix}\begin{Bmatrix}\{\dot{u}\}\\ \dot{x}_b\end{Bmatrix}$$

$$+\begin{pmatrix}[K] & -[K]\{I\}\\ -\{I\}^T[K] & k_b+\{I\}^T[K]\{I\}\end{pmatrix}\begin{Bmatrix}\{u\}\\ x_b\end{Bmatrix}=-\ddot{x}_g\begin{Bmatrix}\{M\}\\ m_b\end{Bmatrix} \quad (3)$$

주구조물의 지지층과 부구조물의 상호작용을 고려하기 위하여 부구조물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬을 식(3)의 해당되는 요소에 추가하여 행렬식으로 표시하면 식(4)와 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix}[M] & 0 & 0\\ 0 & m_b & 0\\ 0 & 0 & m_e\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{\ddot{u}\}\\ \ddot{x}_b\\ \ddot{x}_e\end{Bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix}[C]+[c_{ei}] & -[C]\{I\} & -[c_{ei}]\{I\}\\ -\{I\}^T[C] & c_b+\{I\}^T[C]\{I\} & 0\\ -\{I\}^T[c_{ei}] & 0 & c_e\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{\dot{u}\}\\ \dot{x}_b\\ \dot{x}_e\end{Bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix}[K]+[k_{ei}] & -[K]\{I\} & -[k_{ei}]\{I\}\\ -\{I\}^T[K] & k_b+\{I\}^T[K]\{I\} & 0\\ -\{I\}^T[k_{ei}] & 0 & k_e\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{u\}\\ x_b\\ x_e\end{Bmatrix}$$

$$=-\ddot{x}_g\begin{Bmatrix}\{M\}\\ m_b\\ m_e\end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서,

m_e, $_eC$, k_e : 각각 부구조물의 질량 및 감쇠비, 부구조물의 수평강성

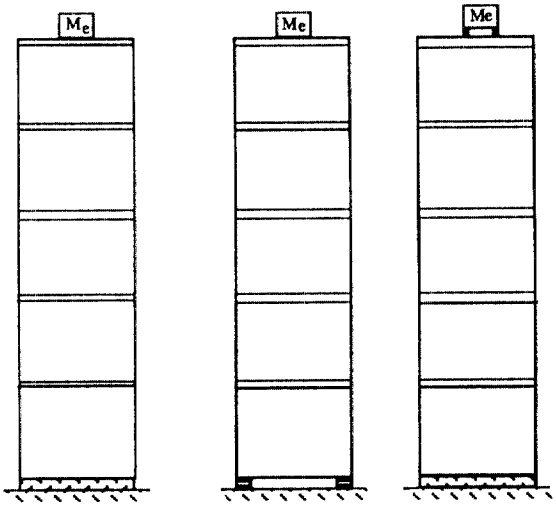
$[c_{ei}]$, $[k_{ei}]$: 부구조물의 감쇠비 및 강성값과 동일하게 부구조물의 설치된 층의 요소행렬에 추가되는 감쇠비 및 강성행렬

4. 예제해석 및 결과고찰

4.1 예제 구조물

지진하중이 구조물에 작용할 때 감진장치의 구조물응답 감소 효율성을 분석하기 위하여 본 논문에서 채택한 주구조물은 5층 강재뼈대 구조물로써 경간은 240인치, 층간 높이는 120인치로 동일하며 기둥부재는 W14×159, 보의 부재는 W36×160이며 그림 1(a)에 제시하였다. 부구조물을 포함하지 않은 주구조물은 일반적인 고정기초구조물(구조물 A)과 감진기초구조물(구조물 B)의 두가지이다.

주구조물 각 층 및 기초슬래브의 질량은 0.05kips-sec2/in, 감쇠율은 5%로 선정하였다. 감진장치가 부구조물의 응답감소에 미치는 영향을 분석하기 위하여 채택한 해석모델은 그림 2(a), (b), (c)에 제시하였다. 그림 2(a)에서는 구조물 A의 5층에 지지부가 고정된 부구조물(구조물 C) , 그림 2(b)에서는 구조물 B의 5층에 지지부가 고정된 부구조물(구조물 D), 그림 2(c)에서는 구조물 A의 5층에 지지부가 감진된 부구조물(구조물 E)을 각각 나타내었다. 부구조물의 질량은 설치된 해당 층 질량의 1/10인 0.005kips-sec 2/in로 선정하였다. 지지부가 고정된 부구조물의 고유진동수는 부구조물의 최대응답을 유발시키기 위하여 고정지반 주구조물의 고유진동수와 일치하게 하였으며, 감쇠율은 5%로 가정하였다.



(a) 구조물 C (b) 구조물 D (c) 구조물 E

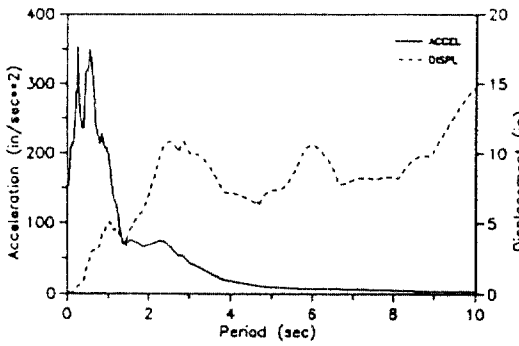
그림 2. 예제해석 구조물 해석모델

4.2 입력하중

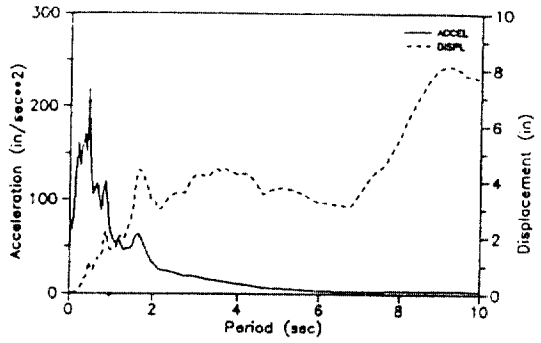
구조물의 응답 및 감진장치의 효율적인 수평강성을 분석하기 위하여 지진의 규모, 진동수 특성, 지속시간 등이 서로 상이한 1940년 El Centro S00E, 1952년 Taft S69E, 1985년 Mexico S00E, 1971년 Pacoima Dam S16E 지진성분을 입력하중으로 채택하였다. 이들 입력지진하중에 대한 가속도 및 변위 응답스펙트럼을 그림 3에 제시하였다.

El Centro 지진에 대한 가속도 응답스펙트럼은 그림 3(a)에 제시한 것과 같이 지반가속도에 대한 증폭은 작은 주기에서 크게 발생하는 반면 큰 주기에서는 매우 작다. 최대 증폭은 주기 0.7초 부근에서 일어나며 그때의 증폭계수는 2.7이다. 또한 변위응답스펙트럼은 주기, 1.5초 이상에서 크게 증가한다. 가속도응답과 변위응답이 교차되는 점의 주기인 1.4초 부근에서 두 응답은 동시에 작게 발생하고 있다. 그림 3(b)는 Taft 지진에 대한 가속도 및 변위 응답스펙트럼이며, 가속도응답의 최대 증폭은 주기 0.5초에서 발생되고 증폭계수는 3.0이다. 가속도응답과 변위응답이 동시에 작게 발생되는 주기는 두 응답곡선이 교차되는 점인 1.3초 부근이다. Taft 지진에 대한 응답스펙트럼은 El Centro 지진에 대한 응답 스펙트럼과 그 증폭정도 및 형상이 유사하다. Mexico 지진에 대한 응답스펙트럼은 그림 3(c)에 제시하였으며, 지반가속도에 대한 증폭은 넓은 주기에서 발생되고 있으며, 또한 최대값도 다른 지진의 경우보다 긴 주기인 2.2초 부근에서 일어나고 증폭계수도 El Centro 지진 및 Taft지진에 비해 큰 4.0이다. 또한 짧은 주기(높은 진동수)에서 증폭은 작은 반면 중간 및 긴 주기에서 증폭은 크게 발생되고 있다. 그림 3(d)는 Pacoima Dam에 대한 응답스펙트럼이며 그 형상은 Mexico 지진을 제외한 다른 지진의 응답 스펙트럼과 유사하다. 이때 최대지반가속도에 대한 가속도응답의 증폭계수는 2.4이며 가속도응답과 변위응답이 동시에 작게 발생하는 주기는 0.7초 부근이다.

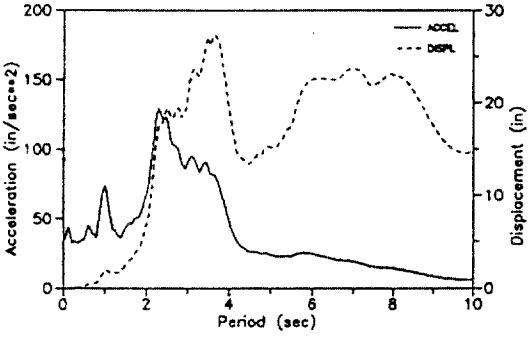
지진의 규모, 증폭정도, 진동수 특성이 서로 상이한 여러 지진을 동일한 구조물의 해석에 입력하중으로 사용함으로써 지반조건 및 지진의 특성이 구조물 응답에 미치는 영향을 분석하였다.



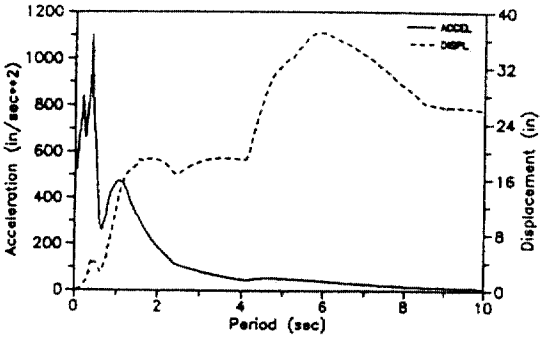
(a) 1940년 El Centro S00E 지진



(b) 1952년 Taft S69E 지진



(c) 1985년 Mexico S00E 지진



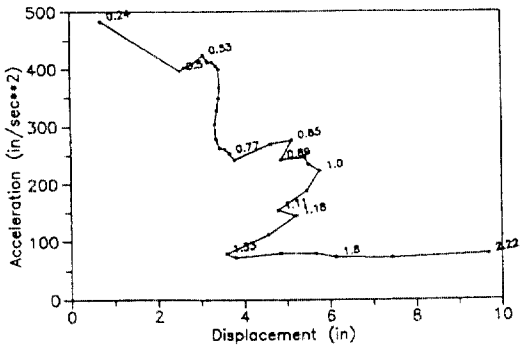
(d) 1971년 Pacoima Dam S16E 지진

그림 3. 입력지진하중의 가속도 및 변위 응답스펙트럼(감쇠율 : 5%)

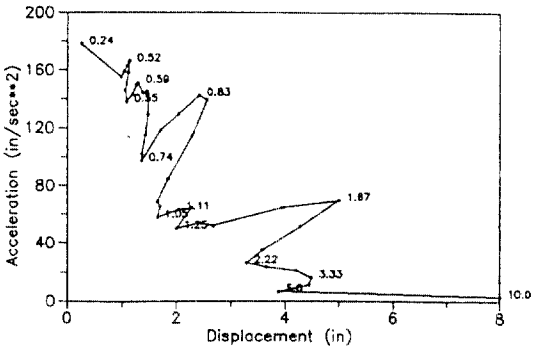
4.3 감진장치의 수평강성

지진하중에 대한 구조물의 응답감소 목적으로 사용되고 있는 감진장치는 가속도 응답을 크게 감소시키는 반면 감진장치의 낮은 수평강성 때문에 변위응답을 크게 유발한다. 따라서 구조물의 변위 응답을 적절하게 제한할 수 있는 감진장치의 유효 수평강성을 분석하기 위하여 여러 지진하중에 대하여 감진장치의 수평강성을 긴 주기인 2.2초에 해당되는 2.4 kips/in에서 부터 짧은 주기인 0.5초에 해당되는 57 kips/in까지 변화시키면서 주구조물 5층에서의 가속도와 변위응답의 상관관계를 계산하여 그림 4(a)에서 (d)까지에 제시하였다. 이 그림에서 각각의 변곡점은 특정 주기에서 구조물 5층의 최대 변위와 가속도 값을 나타낸다. 그림 4(a)는 El Centro 지진에 대한 변위와 가속도의 상관관계이며, 이 그림에서와 같이 주기 1.33초 부터 2.22초 범위에서 변위는 크게 증가하는 반면 가속도는 거의 일정하다. 또한 주기 1.33초 이하에서 가속도는 크게 증가하고 변위는 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 El Centro 지진하중에 대한 가장 효과적인 감진장치의 수평강성은 고유주기 1.33초에 해당되는 6.66 kips/in이며 그림 3(a)에 제시한 가속도와 변위가 동시에 작게 발생되는 주기 1.3초와도 거의 일치하고 있다.

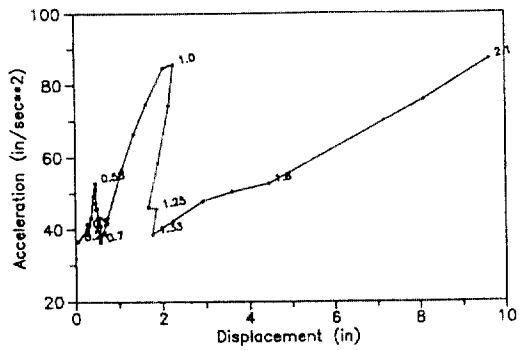
상기방법과 유사하게 Taft지진에 대한 변위와 가속도의 상관관계는 그림 4(b)에 제시하였으며, 그림에서와 같이 상관관계는 주기에 따라 크게 변하고 있다. 주기 1.25초 이상에서 변위는 크게 증가하나 가속도는 약간 감소하며, 1.25초 이하에서 가속도는 크게 증가하고 변위는 약간 감소한다. 따라서 감진장치의 유효 수평강성은 El Centro 지진하중에 대한 값과 거의 유사하게 고유주기 1.25초에 해당되는 값이다. Mexico 지진에 대한 변위와 가속도의 상관관계를 그림 4(c)에 제시하였으며 주기 1.33초 이상에서는 가속도와 변위가 다같이 선형적으로 증가하고 주기 0.7초에서 1.33초 사이에서 가속도가 변



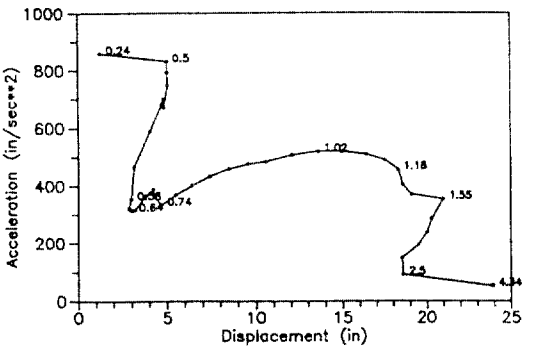
(a)El Centro 지진



(b) Taft 지진



(c) Mexico 지진



(d) Pacoima Dam 지진

그림 4. 구조물 B에 대한 5층의 변위 - 가속도 상관관계 (단위 : sec)

위에 비해 크게 변화한다. 또한 주기 0.7초 이하에서 변위와 가속도응답이 감소하고 있다. 그림에서 보인 것과 같이 Mexico지진에 대해서는 감진장치의 낮은 수평강성에서 응답이 크게 증가하고 있다. 대부분 감진장치의 주기는 2초로 설계(8)되고 있기 때문에 Mexico지진과 같이 주기가 긴 지진 작용시 감진장치가 설치된 구조물은 그 응답이 증폭되므로 유의하여야 한다. 그림 4(d)에서는 Pacoima Dam 지진에 대한 구조물의 변위와 가속도의 상관관계를 나타내며, 그 형상은 El Centro 지진과 Taft 지진에 대한 것과 유사하다. Pacoima Dam 지진규모는 다른 입력지진하중의 규모보다 크기 때문에 구조물의 응답 감소에 필요한 유효수평강성은 33.32kips/in로 다른 감진장치의 특성치보다 훨씬 크다.

주구조물의 내진해석에 사용된 기초감진장치의 유효수평강성은 El Centro 지진을 대표지진으로 고려하여 6.66kips/in로 가정하였다.

4.4 구조물 A 및 B의 지진응답

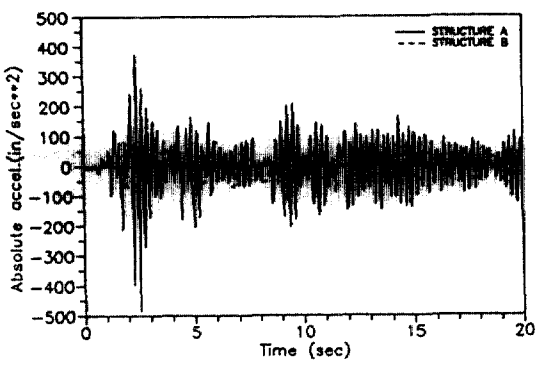
부구조물을 포함하고 있지 않은 구조물 A및 B의 구조물 진동주기 특성은 표 1에 제시하였으며, 표에 보인 것과 같이 구조물 A의 고유진동주기는 0.244초, 구조물 B의 고유진동주기는 1.333초이다. 구조물 A에서 모드수가 증가할수록 그 모드에 해당되는 진동주기는 구조물B의 다음 모드의 진동주기에 접근하는 특성을 보이고 있다.

그림 5(a), (b), (c), (d)는 El Centro, Taft, Mexico,

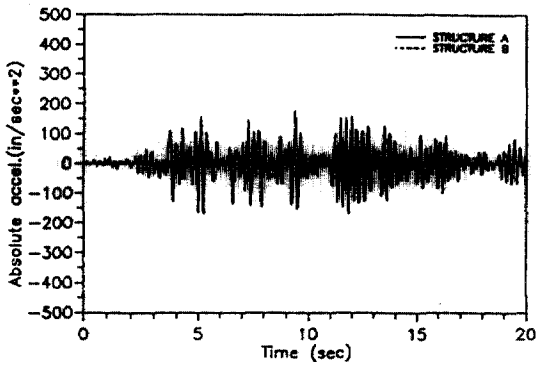
표 1. 구조물A와 B의 진동주기

(단위 : sec)

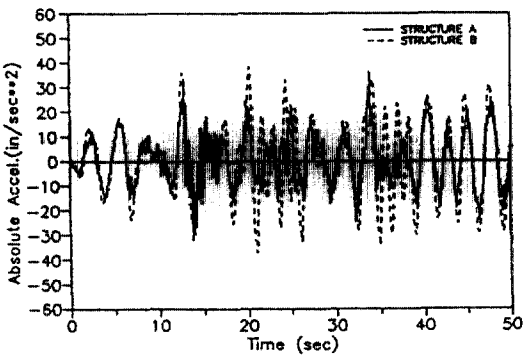
모드 / 구조물	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
구조물 A	0.244	0.080	0.046	0.033	0.027	
구조물 B	1.333	0.137	0.063	0.041	0.031	0.027



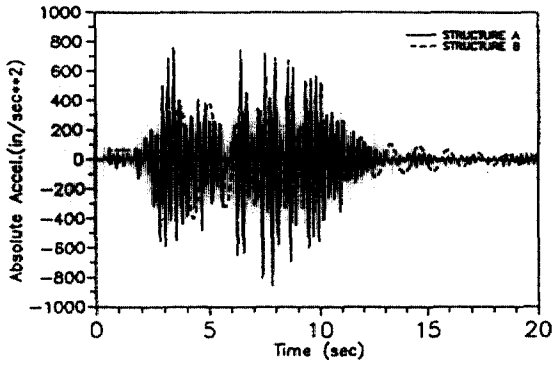
(a) El Centro 지진



(b) Taft 지진



(c) Mexico 지진

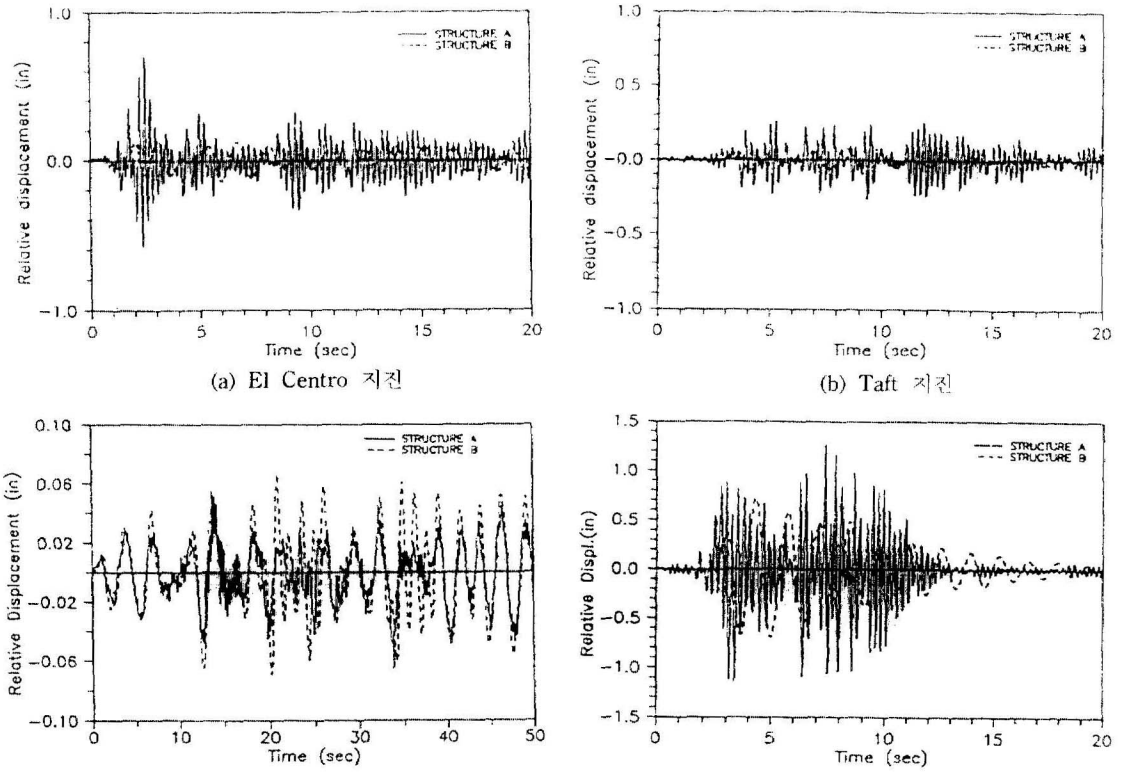


(d) Pacoima Dam 지진

그림 5. 구조물 A와 B의 5층에 대한 가속도시간이력

Pacoima Dam 지진에 대한 구조물 A 및 B의 5층 가속도시간이력을 나타내고 있다. 그림 5(a)에 보인 것과 같이 El Centro 지진에 대한 구조물 A의 최대가속도응답은 1.25g이며, 최대지반가속도값 보다 3.7배 증폭되었음을 알 수 있다. 또한 구조물 B에 대한 최대응답은 최대지반가속도 보다 2.5배 감소하였음을 알 수 있다. 따라서 Elcentro 지진에 대해 감진기초 구조물의 응답은 일반적인 고정기초 구조물 응답의 16%로 매우 작다. 그림 5 (b)는 Taft 지진에 대한 구조물 A와 B의 5층에 대한 가속도시간이력이며, 구조물 A의 최대가속도응답은 0.46g로써 최대지반가속도값 보다 2.7배 증폭되었고, 구조물 B에 대한 최대가속도응답은 0.14g로 구조물 A의 최대응답값의 30%이다. 그림 5(c)는 Mexico 지진에 대한 구조물 A와B의 5층에 대한 가속도시간이력이며, 증폭된 구조물 응답은 오랫동안 감소되지 않고 있으며, 구조물 B의 최대응답값이 구조물 A의 최대값 보다도 큰 특성을 보인다. 특히 구조물 B 의 응답은 지진발생 중간에서 크게 발생되고 있음을 알 수 있다. 그림 5(d)에서는 Pacoima Dam 지진에 대한 구조물의 가속도응답을 나타내고 있으며, 그림에서 알 수 있듯이 구조물 A의 응답은 구조물 B의 응답 보다 2.1배 크며 구조물 A의 최대응답은 최대지반가속도 보다 1.9배 증가하고 있다.

그림 6에서는 그림 5와 유사하게 각 지진하중에 대한 구조물 A와 B의 5층 변위응답을 나타내고 있다. 구조물 B의 5층 변위응답은 기초슬래브에 대한 상대값이기 때문에 Mexico 지진에 대한 응답을 제외하고는 구조물 A에 대한 값보다 훨씬 작다. 그림 6(a), (b), (d)에 보인 것과 같이 구조물 B의 5층 최대상대변위응답은 고정지반 구조물 보다도 1/2-1/5 정도 작은 값이다. Mexico지진에 대한 구조물 B의 변위응답은 가속도응답에서와 같이 구조물 B의 응답이 구조물 A 의 값 보다 더 크다. 그러므로 Me-



(a) El Centro 지진 (b) Taft 지진

(c) Mexico 지진 (d) Pacoima Dam 지진

그림 6. 구조물 A와 B의 5층에 대한 변위시간이력

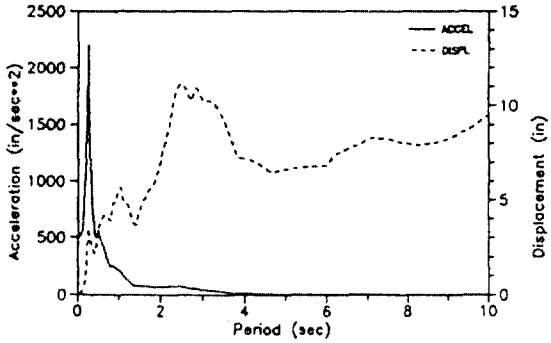
xico의 경우와 같이 지반이 연약하여 지반의 주된 진동주기가 대단히 긴 경우에는 감진장치를 사용하는 것이 별 의미가 없게된다.

4.5 부구조물의 지진응답

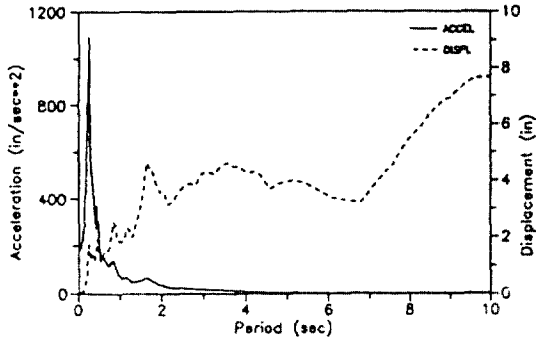
부구조물이 설치될 주구조물 5층의 지진하중에 대한 시간이력 특성을 파악하기 위하여 구조물 A의 5층에 대한 가속도 및 변위 응답스펙트럼을 그림 7에 제시하였다. 그림에서와 같이 Mexico 지진에 대한 응답스펙트럼을 제외하고 그 형상은 거의 유사하다.

또한 기초감진장치 특성 결정방법과 유사하게 부구조물의 지지부에 설치된 감진장치의 특성을 파악하기 위하여 El Centro 지진에 대하여 감진장치의 주기 3.33초에 해당되는 수평강성을 0.02 kips/in에서 부터 주기 0.5초에 해당되는 수평강성, 0.79 kips/in 까지 변화시키면서 부구조물의 가속도와 변위의 상관관계를 계산하여 그림 8(a)에 제시하였다. 그림에서와 같이 주기 1.43초 이상에서 변위는 증가하는 반면 가속도응답은 거의 일정하고 주기 1.43초 이하에서는 가속도응답은 크게 증가하는 반면 변위응답은 약간 감소한다. 이와 유사한 방법으로 고정기초 구조물 5층의 응답스펙트럼으로 부터 직접 구한 가속도와 변위의 상관관계를 그림 8(b)에 제시하였다. 그림에 제시한 것과 같이 고정기초 구조물의 5층에서 구한 가속도와 변위의 상관관계는 부구조물의 지지부에 설치된 감진장치의 특성 변화에 따른 것과 그 형태는 거의 유사하나 부구조물의 질량 및 부구조물과 주구조물의 상호작용 영향등에 의하여 그 응답은 약간 상이하지만 대략적인 방법으로 부구조물이 설치될 주구조물 해당 층의 응답스펙트럼에서 부구조물 지지부의 감진장치특성이 직접 결정될 수 있다.

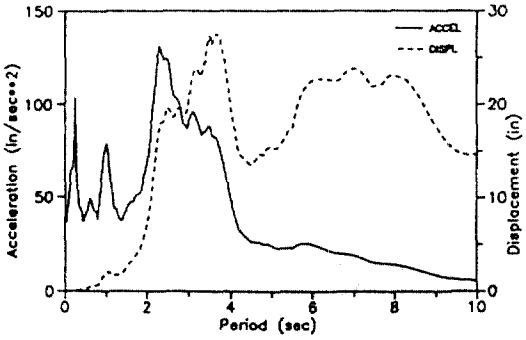
El Centro지진에 대한 구조물 A의 5층 응답스펙



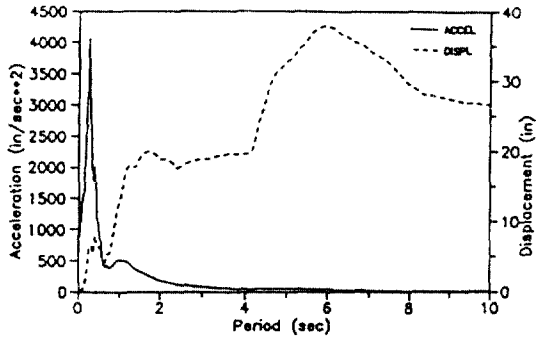
(a) 1940년 El Centro S00E 지진



(b) 1952년 Taft S69E 지진

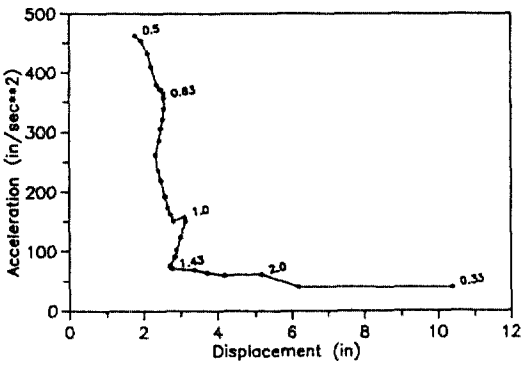


(c) 1985년 Mexico S00E 지진

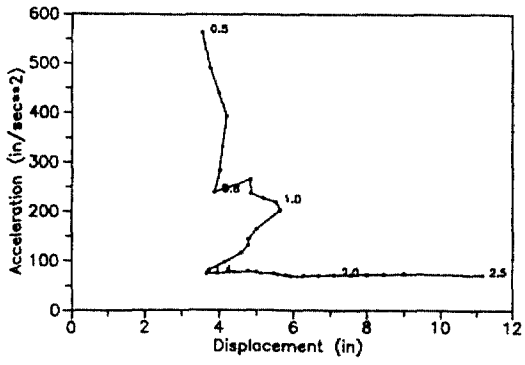


(d) 1971년 Pacoima Dam S16E지진

그림 7. 고정기초 구조물 5층의 가속도 및 변위 응답 스펙트럼



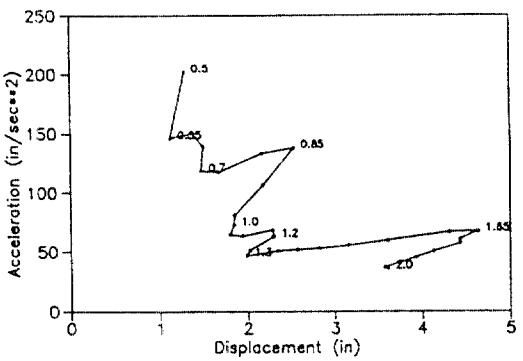
(a) 지지부 감진장치 특성 변화에 따른 상관관계



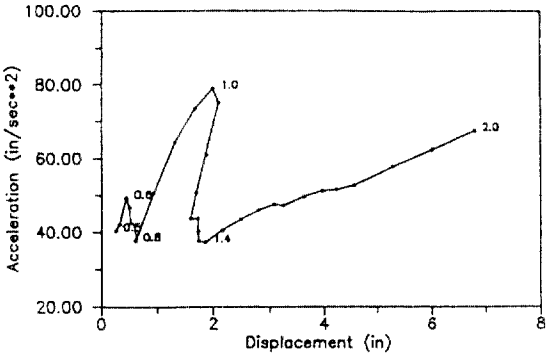
(b) 구조물 A의 5층 응답스펙트럼에 따른 상관관계

그림 8. 부구조물의 변위 - 가속도 상관관계 (단위 : sec)

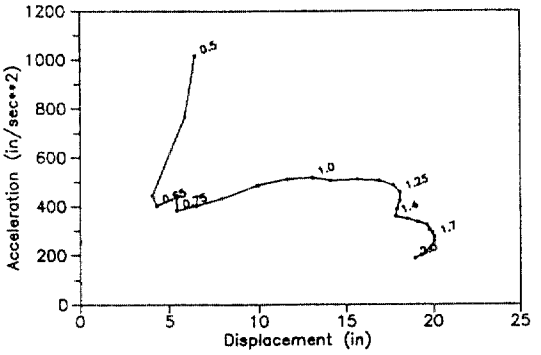
트럼으로 부터 직접 변위와 가속도의 상관관계를 결정하는 방법에 근거하여 Taft지진, Mexico지진, Pacoima Dam에 대한 주구조물 5층에서의 변위와 가속도 상관관계를 그림 9에 보였다. Taft지진에 대한 변위와 가속도의 상관관계는 그림 9(a)에 보인 것과 같이 주기 1.3초 부근에서 변위응답과 가속도 응답이 동시에 작다. Mexico지진에 대한 상관관계는 그림 9 (b)에 보인 것과 같이 감진계통의 주기가 길어질 수록 응답은 증가하며 짧은 주기일 수록 응답감소에 유리함을 보이고 있다. Pacoima Dam



(a) Taft 지진



(b) Mexico 지진



(c) Pacoima Dam 지진

그림 9. 구조물 A의 5층 응답스펙트럼에 따른 변위 - 가속도 상관관계

지진에 대한 상관관계는 그림 9 (c)에 보였으며 주기 0.65초 이상에서 가속도응답은 거의 일정하나 지진의 규모가 다른 지진 보다 커서 변위응답이 크게 증가하고 있다.

지지부 감진장치의 변위와 가속도 상관관계는 지진의 규모, 주진동수, 지속시간등에 따라 서로 상이하지만 본 논문에서는 El Centro지진을 대표 지진으로 선정하여 변위와 가속도 두 응답이 동시에 작게 발생되는 진동주기인 1.4초에 해당되는 수평강성, 0.1 kips/in 를 지지부 감진장치의 특성으로 채택하였다. 구조물 C, D, E에 대한 진동주기 특성은 표2에 제시하였다.

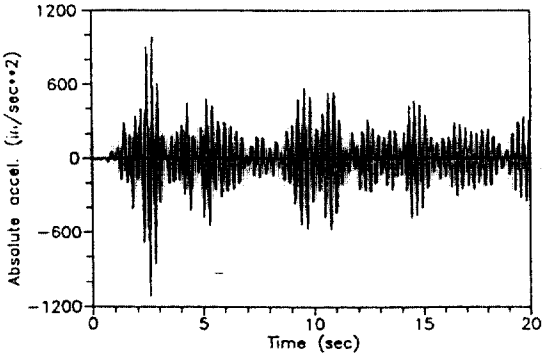
그림 10에서는 El Centro 지진하중에 대한 구조물 C, D, E에 설치된 부구조물의 가속도 응답을 비교하였다. 그림 10(a)에 보인 것과 같이 구조물 C에 설치된 부구조물의 최대 가속도응답은 3.03g이며, 이 최대응답은 최대지반가속도 보다 약 9배 증폭된

표 2. 구조물 C, D, E의 진동주기

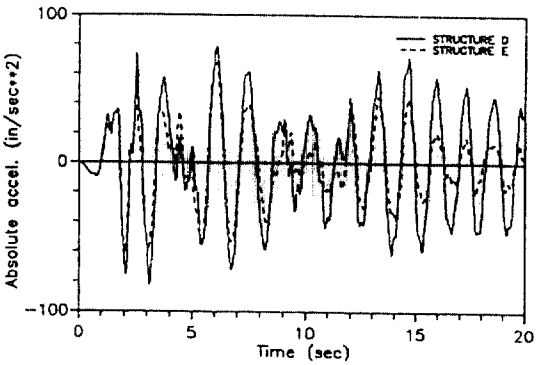
(단위 : sec)

모드 / 구조물	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
구조물 C	0.270	0.221	0.080	0.046	0.033	0.027	
구조물 D	1.351	0.242	0.136	0.063	0.041	0.031	0.027
구조물 E	1.408	0.244	0.080	0.046	0.033	0.027	

것이다. 그림 10(b)에서는 구조물 D와 E에 설치된 부구조물의 가속도 시간이력을 비교하여 제시하였으며, 그림에서와 같이 구조물 D에서의 최대가속도 값은 0.21g, 구조물 E에 대해서는 0.18g이다. 구조물 E에 대한 최대값은 구조물 C의최대값 보다 약 94% 작은 값이다. 특히 구조물 E의 응답은 구조물 D의 응답값 보다도 작으며 15초 이후에서는 크게 감소하고 있다.

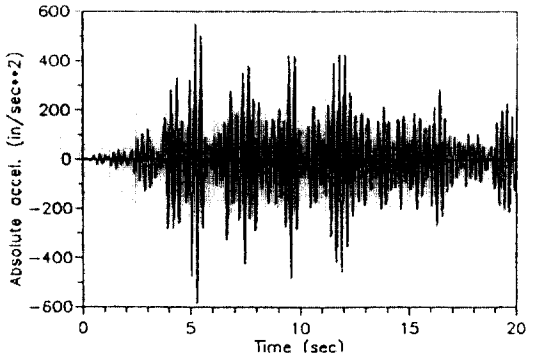


(a) 구조물 C

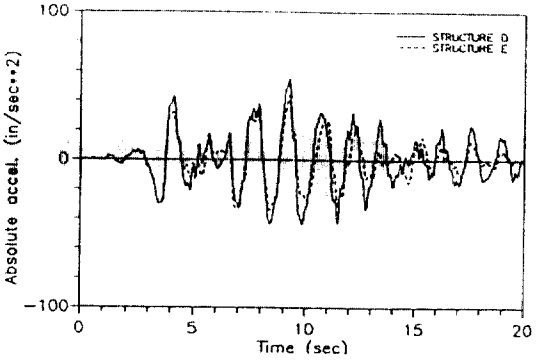


(b) 구조물 D와 E

그림 10. El Centro 지진에 대한 부구조물의 가속도 시간이력



(a) 구조물 C



(b) 구조물 D 및 E

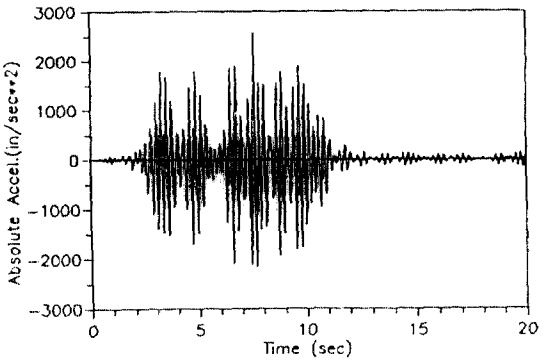
그림 11. Taft 지진에 대한 부구조물의 가속도 시간 이력

그림 11에서는 Taft 지진에 대한 구조물 C, D, E에 설치된 부구조물의 가속도응답을 제시하였으며, 그림 11(a)에서와 같이 구조물 C에 대한 최대응답은 1.52g로써 El centro 지진에 대한 응답 보다 훨씬 작으며 구조물 D 및 E에 대한 응답 감소 형태는 그림 10(b)와 유사하다. 구조물 E에 대한 최대 가속도응답은 구조물 C의 최대값 보다 약 93% 작다. 따라서 구조물 E와 같은 감진장치가 El Centro 및 Taft 지진에 대한 구조물의 지진응답 감소에 매우 효과적임을 알 수 있다.

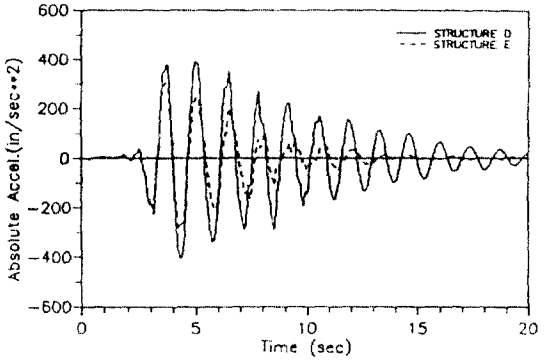
그림 12에서는 Pacoima Dam 지진에 대한 구조물 C, D, E의 가속도 응답을 비교 제시하였으며, 그림 12(a)에 보인 것과 같이 구조물 C의 최대 가속도 응답은 6.7g로 최대 지반가속도의 5.7배이다. 또한 구조물 E의 가속도 응답은 구조물 D의 응답 보다도 25% 작은 값이며 이 지진에 대한 응답은 11초 이후에는 크게 감소함을 보인다.

Mexico 지진에 대한 구조물 C, D, E의 가속도 응답을 그림 13에 제시하였으며, 그림에서와 같이 구조물 C, D, E의 응답은 서로 유사함을 보이고 있다. 특히 구조물 D 및 E의 응답은 지반가속도 값 보다 큰 값을 보이고 있다.

따라서 기초감진장치 및 지지부 감진장치는 지진하중에 대한 구조물의 응답감소에 매우 효과적이며, 특히 부구조물이 주구조물의 진동수와 일치하는 경우에 부구조물의 응답감소에 매우 효과적임을 알 수 있다. 지지부에 감진장치가 설치된 부구조물의 응답은 감진기초구조물상의 고정지지 부구조물의 응답보다도 작기 때문에 복잡한 구조물 내에서 부구조물의 지지부만을 감진시키는 것이 지진하중에 대한

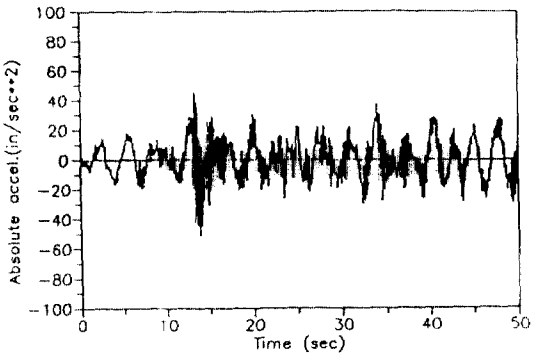


(a) 구조물 C

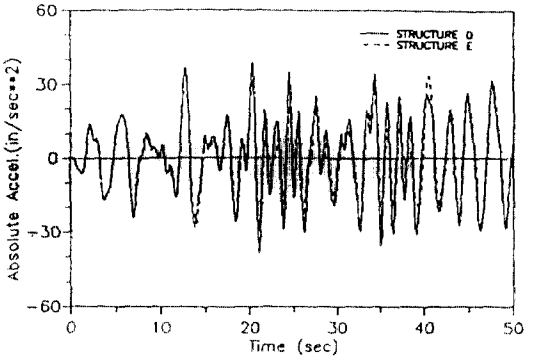


(b) 구조물 D 및 E

그림 12. Pacoima Dam에 대한 부구조물의 가속도 시간이력



(a) 구조물 C



(b)구조물 D 및 E

그림 13. Mexico 지진에 대한 부구조물의 가속도 시간이력

응답감소에 효과적임을 알 수 있다.

5. 결 론

감진장치가 설치된 주구조물 및 부구조물의 지진응답을 다른 일반적인 고정기초 구조물의 지진응답과 비교함으로써 구조물에 대한 감진장치의 지진응답 감소 효율성을 본 논문에서 분석하였다. 감진장치는 멕시코 지진과 같이 지반이 연약하여 지반의 주된 진동주기가 대단히 긴 경우를 제외하고는 대부분의 지진하중에 대하여 구조물의 응답감소에 매우 효과적임을 알 수 있었다. 특히 부구조물 지지부에만 감진장치가 설치된 경우가 일반적인 고정기초 구조물 상의 지지점 고정 부구조물은 물론 감진기초 구조물상에 설치된 지지점 고정 부구조물보다 지진하중에 대한 구조물의 응답감소에 매우 효과적임을 해석결과를 통하여 알 수 있었다. 따라서 고정지반 구조물상의 지지점에 감진장치가 설치된 부구조물이 지진하중에 대한 구조물의 응답감소에 매우 효과적이며 또한 안전성 관련 중요 구조물의 안전성 향상에도 기여할 수 있다. 또한 지지점에만 감진장치를 설치하는 것은 구조물 설계 측면에서 뿐만 아니라 설치에도 용이하다. 감진장치는 원자력 관련 시설 중에서 유사한 위치에 지지점을 갖고 있는 계기판, 배관, 부품등과 같이 안전성에 중요한 부품에도 적용될 수 있으며, 감진장치의 감쇠비 및 수평강성을 지반특성 및 구조물 특성에 따라 적절하게 조절하므로써 지진하중에 대한 구조물의 응답을 크게 감소시킬 수 있음을 알 수있다.

참 고 문 헌

1. 건설부, 건축물의 구조기준등에 관한 규칙, 1988.
2. F. Naeim, *The Seimic Design Handbook*. Structural Engineering Series, Van Nostrand Reinhold, New York(1989).
3. J. M. Kelly, Seismic response of light internal equipment in base-isolated structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13, 711-732 (1985).
4. A.S. Papageorgiou and B.C. Lin, Study of the earthquake response of the base-isolated law and justice center in Rancho Cucamonga. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 18, 1189-1200(1989).
5. N.M. Mostaghel and M. Khodaverdian, Dynamics of resilient-friction base isolator(R-FBI), *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15, 379-390(1987).
6. I.G.Buckle and R.L.Mayes, Seismic Isolation : History, Application, and Performance - A world view. *Earthquake Spectra*, 6, Number 2, 161-201 (1990).
7. J.M. Kelly, Aseismic base isolation : Review and bibliography. *Soil Dynamic Earthquake Engineering*, 5, 202-216(1986).
8. L.Su, et al., A comparative study of performances of various base isolation systems, part I : shear beam structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 18, 11-32(1989).
9. L.Su, et al., A comparative study of performances of various base isolation systems,part II : sensitivity analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19, 21-33(1990).
10. 김영상, 이동근, "감진계통 지지부가 설치된 기기의 지진해석", **대한토목학회논문집** 제12권 제2호, 1992. 6.
11. USNRC, *Standard Review Plan*. NUREG-800, revision 2(1984).

(接受 : 1992. 7. 9)