

아치구조물에 대한 지진동의 수평·상하 동시입력에 대한 가속도 응답특성

정 찬 우*

정 환 목**

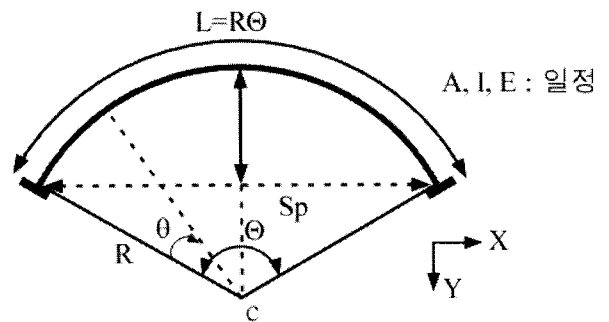
1. 연구의 배경 및 목적

일반적인 각형 라멘 구조물에 있어서, 상하지진동은 수평지진동에 비하여 구조물에 미치는 영향이 적다고 간주되어, 내진설계에 있어서는 수평지진동만을 고려하는 것이 일반적이다. 그러나, 공간구조물에서는 수평지진동에 의해 수평방향뿐만 아니라 연직방향으로도 구조물의 동적응답이 크게 증폭되며, 또한 상하지진동에 의해서도 연직방향뿐만 아니라 수평방향으로도 구조물의 동적응답이 크게 증폭되는 특성을 가지고 있으므로, 수평·상하 양방향의 지진동을 모두 고려할 필요가 있다. 일본의 경우, 중요 구조물로 구분되는 원자력발전소의 A, As 클래스시설에 있어서는 상하지진동을 고려하도록 규정되어 있고, 그 적용에 있어, 상하지진력은 수평지진력과 동시에 그리고 불리한 방향으로 조합되며, 상하지진력의 크기는 수평지진력의 1/2으로 하도록 규정되어 있다¹⁾. 본 논문에서는 수평지진동·상하지진동을 동시에 고려할 경우에 대한 아치구조물의 진동특성을 고찰하고, 지진동의 동시입력에 대한 등가정적지진력의 설정법을 고찰함을 그 목적으로 한다.

2. 해석모델

해석모델은 <그림 1>에 나타난 아치구조물을 20분할한 유한요소 모델을 이용한다. 아치의 단면적 A 는 1cm^2 , 단면2차 모멘트 I 는 56.3cm^4 , 단면계수 Z 는

7.5cm^3 , 단면이차반경 i 는 7.5cm , 영계수 E 는 206Gp 로 고정한다. 아치의 주장 L 을 조정함으로써, 아치의 겹보기 세장비 $\lambda = L/i$ 가 100, 150, 200이 되도록 설정하고, 아치의 개각(開角) θ 는 $30^\circ \sim 180^\circ$ 까지 30° 간격으로 설정한다. 더하여, 단위길이당 질량 ρg 를 조정함으로써, 1차고유진동수 f_1 이 $1\text{Hz} \sim 3.5\text{Hz}$ 까지 0.5Hz 씩 차이가 나는 모델을 설정하였다. 즉, 겹보기 세장비 λ 에 따라 3종류의 모델, 개각 θ 에 따라 6종류의 모델, 1차고유진동수 f_1 에 따라 6종류의 모델, 즉, $3 \times 6 \times 6 = 108$ 개의 모델을 검토하였다.



<그림 1> 해석모델(아치구조물)

3. 지진동의 입력조건

지진동의 입력조건으로는 아래에 기술한 4종류의 실지진기록을 이용하여 동적응답해석을 수행한다. 각 지진동의 수평성분과 상하성분을 각각 독립적으로 입력할 경우와 동시에 입력할 경우의 양쪽을 모두 응답해석하여 결과를 비교한다.

수평·상하지진에 대한 연구로서, 矢花²⁾ 등은 감쇠정수 5%의 1질점계의 상하·수평지진응답을 구하

* 정희원, 경북대학교 연구원

** 정희원, 경동대학교 교수

여, 각각의 최대응답치의 발생시각이 일치하지 않음을 확인하였다. 또한, 수평지진동의 최대가속도발생 시각에 있어서의 상하지진력은 수평지진력 크기의 0.4~0.5배정도라는 것을 밝혔다. 이에 의거, 본 논문에서는 수평지진동의 가속도의 최대치를 100gal로 기준화시키고, 상하지진력의 진도는 수평지진력의 1/2의 값을 채용한다.

- El-Centro 1945, 5, 18 NS, UD
- Taft 1952, 7, 21 EW, UD
- Miyagi 1978, 6, 12 NS, UD
- Hachinohe 1968, 5, 16 NS, UD

4. 순간가속도응답분포의 추출조건

아치구조물의 지진동응답특성을 특정 시각의 순간적인 가속도응답분포를 비교함으로써 고찰한다. 순간가속도응답분포를 추출하는 시각의 판단조건으로서 아래의 4종류의 판단조건을 적용하고, 판단조건에 따른 응답분포특성의 차이의 유무를 고찰한다.

- D판정 : 변위벡터가 최대가 되는 시각 (기호:□)
- A판정 : 절대가속도응답벡터가 최대가 되는 시각 (기호:△)
- S판정 : 응력이 최대가 되는 시각 (기호:▲)
- R판정 : 입력방향 반력이 최대가 되는 시각 (기호:○)

또한, 아래와 같은 3가지 조건에 따른 시각(時刻)의 상관관계를 고찰한다.

- T_H : 수평지진동의 단독입력시 절대가속도응답 벡터가 최대가 되는 시각

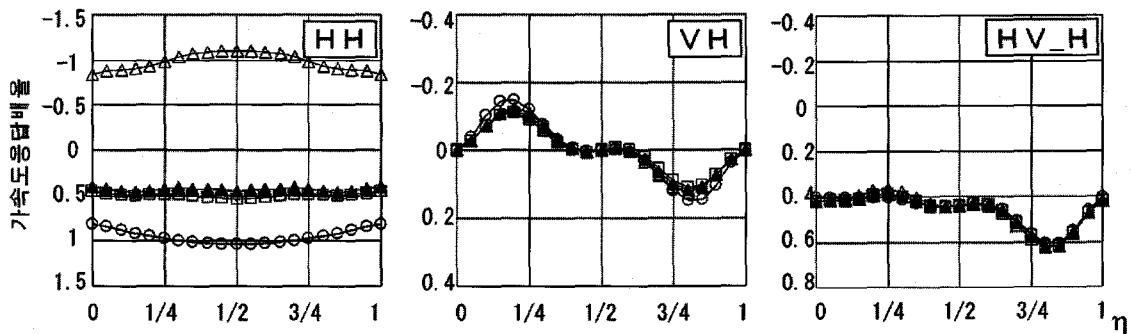
- T_V : 상하지진동의 단독입력시 절대가속도응답 벡터가 최대가 되는 시각
- T_{HV} : 수평·상하지진동의 동시입력시 절대가속도응답벡터가 최대가 되는 시각

5. 순간가속도응답분포특성

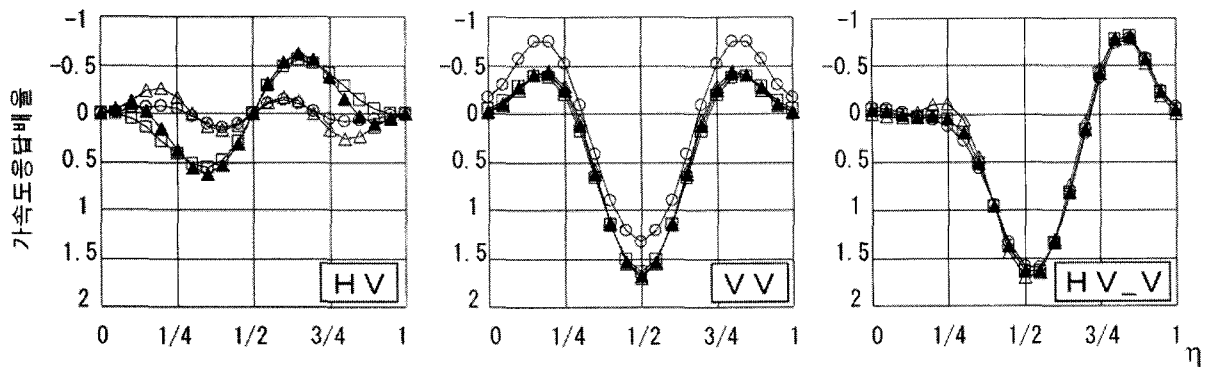
5.1 분포형에 관한 고찰(최대응답을 보여주는 위치에 대하여)

<그림 2>~<그림 5>는 순간가속도응답의 분포특성을 잘 나타내고 있다. 각 그림의 횡축은 아치에 있어 무차원화한 좌측단에서부터의 각도($\eta = \theta/\theta$)를 나타내고, 종축은 순간가속도응답을 입력지진동의 최대치로 나눈 순간가속도응답배율을 나타낸다. 즉, 각 그림은 순간가속도응답배율의 분포특성을 나타내고 있다. 각 그림은 1지진파×4판단조건에 의한 4의 분포로 구성되어 있다.

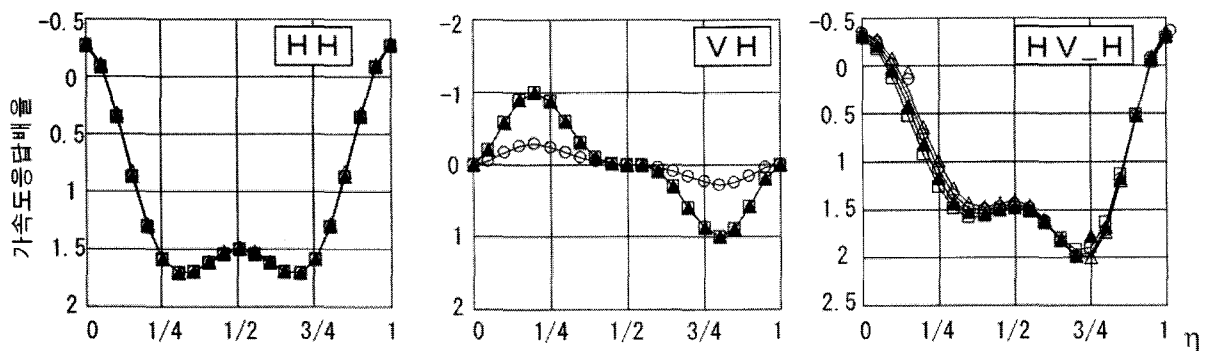
<그림 2>와 <그림 3>은, 1차고유진동수 $f_1 = 2.0\text{Hz}$ 이고, 개각 $\theta = 30^\circ$ 을 가지는 아치를 대상으로 하고 있고, <그림 4>와 <그림 5>는 1차고유진동수 $f_1 = 2.0\text{Hz}$ 이고, 개각 $\theta = 180^\circ$ 을 가지는 아치를 대상으로 한다. <그림 2>와 <그림 4>는, 왼쪽에서 차례로, 수평지진동 단독입력시의 수평가속도응답배율 분포(HH), 상하지진동 단독입력시의 수평가속도응답배율분포(VH), 수평·상하지진동 동시입력시의 수평가속도응답배율분포(HV_H)를 나타낸다. 또한 <그림 3>과 <그림 4>는, 왼쪽에서 차례로, 수평지진동 단독입력시의 연직가속도응답배율분포(HV), 상하지진동 단독입력시의 연직가속도응답배율분포(VV) 및 수평·상하지진동 동시입력시의 연직가속도응답배율분포(HV_V)를 나타낸다.



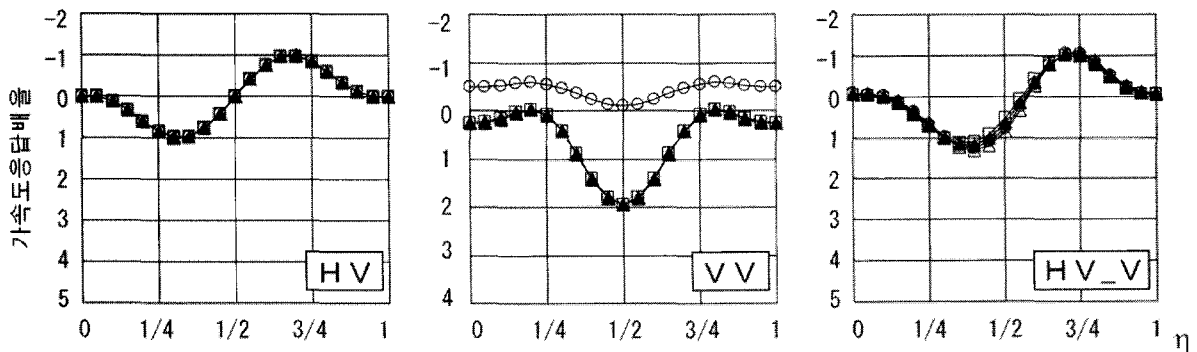
<그림 2> 수평방향의 순간가속도 응답배율분포도($f_1 = 2.0\text{Hz}$, 개각 = 30°)



〈그림 3〉 연직방향의 순간가속도 응답배율분포($f_1=2.0\text{Hz}$, 개각 $=30^\circ$)



〈그림 4〉 수평방향의 순간가속도 응답배율분포($f_1=2.0\text{Hz}$, 개각 $=180^\circ$)



〈그림 5〉 연직방향의 순간가속도응답배율분포($f_1=2.0\text{Hz}$, 개각 $=180^\circ$)

각 그림에서 HH 및 VV의 분포는 대칭분포, HV 및 VH의 분포는 역대칭분포를 보이고 있으나, HV_H 및 HV_V분포는 대칭형분포가 아닌 비대칭 분포를 보인다. HH, HV, VH 분포는 개략적으로 하나의 분포형을 보이고 있으나, VV의 경우 개각 θ 의 영향에 의한 대칭2차 모드의 고유진동모드형상의 특징이 강하게 발현하여, 다음과 같은, 2종류의 서로 특징이 다른 분포형을 보이고 있음을 알 수 있다. 먼

저, 아치의 중앙에서 진폭이 큰 3파형분포를 VV1분포라 부르기로 한다. 이는 주로 휨에 의한 변형을 하는 휨지배형 가속도분포형을 나타낸다. 다음으로, 아치의 양측면에서 진폭이 크게 발생하는 3파형분포를 VV2분포라 부르기로 한다. 이는 주로 축력에 의한 변형을 하는 축력지배형 가속도분포형을 나타낸다²⁾.

HV_H분포는 HH분포 및 VH분포가 더해진 형태의 분포형을 보인다. HH분포 및 VH분포가 하나의

분포형을 보이고 있으므로, HV_H분포형도 하나의 분포 형을 보인다. HV_V분포형은 HV분포와 VV1 또는 VV2분포가 더해진 형태의 분포형을 보이고 있으며, 이를 HV_V1분포 및 HV_V2분포라 부르기로 한다. HV_H분포, HV_V1분포, HV_V2분포는 HH분포와 VH분포의 진폭비, HV분포와 VV1분포 혹은 VV2분포의 진폭비에 따라 다양한 형태의 분포형을 형성한다.

해석모델 설정시, 본 논문에서는 걸보기세장비 λ , 1차고유진동수 f_1 및 개각 θ 를 구조물 형상에 대한 파라메타로 삼았으나, 걸보기세장비 λ 에 대한 분포형의 변화는 비교적 작고, 주로, 개각 θ 및 1차고유진동수 f_1 에 의하여 변화하는 것을 알 수 있었다. 또한, 순간가속도응답분포를 추출하는 시각의 타당성을 보기위하여, 4종류의 판단조건을 선정하였는데, 판단조건에 따른 응답분포의 차이는 작았다.

5.2 절대가속도응답벡터가 최대가 되는 시각 T에 관한 고찰

<그림 6>은 수평·상하지진동의 동시입력시, 절대가속도응답벡터가 최대가 되는 시각과 단독입력시 절대가속도응답벡터가 최대가 되는 시각이 일치하는 비율을 나타내고 있다. 여기서, 응답벡터란 지진동의 수평응답과 수직응답을 하나의 벡터로 합성하였다는 것을 나타낸다.

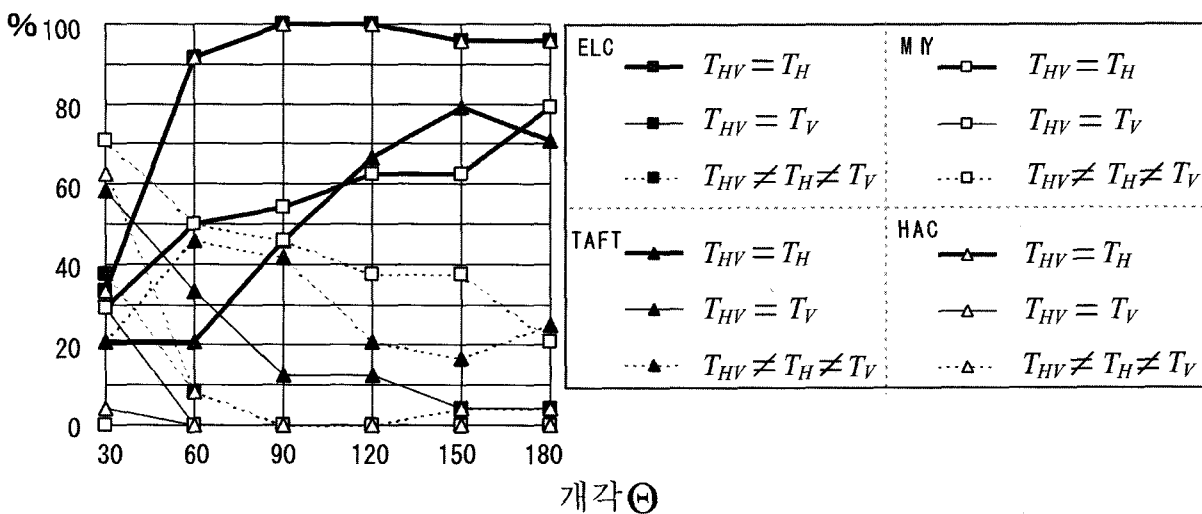
그림의 횡축은 개각 θ 를 나타내고, 종축은 6개의

1차고유진동수 $f_1 \times 4$ 판단조건으로 24회의 해석횟수에 대해, 수평·상하지진동의 동시입력에 대한 절대가속도응답벡터가 최대가 되는 시각 T_{HV} 과 수평동의 단독입력에 대한 절대가속도응답벡터가 최대가 되는 시각 T_H 이 일치하는 경우, T_{HV} 가 상하동의 단독입력에 대한 절대가속도응답벡터가 최대가 되는 시각 T_V 와 일치하는 경우, T_{HV} 가 T_H 와 T_V 의 양쪽 시각과 모두 일치하지 않는 경우의 횟수를 전 해석수(24)에 대한 백분율로 표시하고 있다.

그럼으로부터, 4지진파에 대하여 모두 개각 θ 이 클수록 $T_{HV} = T_H$ 가 되는 비율이 크게 되고, 개각 θ 가 작게 될수록 $T_{HV} = T_V$ 또는 $T_{HV} \neq T_H \neq T_V$ 가 되는 비율이 크게 됨을 알 수 있다. El-Centro파와 Hachinohe파 입력의 경우, 개각 60° 이상이면, 90%이상의 비율로 $T_{HV} = T_H$ 가 되는 것을 알 수 있으며, 즉, 수평지진동입력에 의한 동적응답이 지배적이 됨을 알 수 있다. Taft파와 Miyagi파의 경우, 60° 이상에서도 $T_{HV} \neq T_H \neq T_V$ 의 비율이 20%이상 발생함을 보임으로서, 수평·상하지진동의 동시입력시의 최대 응답발생을 고려할 필요성이 있음을 보여준다.

5.3 최대응답치에 관한 고찰

<그림 7>~<그림 9>는, 1차고유진동수 f_1 이 1 Hz~3.5 Hz이고, 걸보기 세장비 λ 가 100, 150, 200인 아치에 수평·상하지진동동시입력에 대한 HV_H, HV_V1 및 HV_V2분포의 최대치(HV_Hmax, HV_V1max,



<그림 6> 4지진파입력에 대한 THV와 TH, TV가 일치하는 비율

HV_V2,max)를 보여준다.

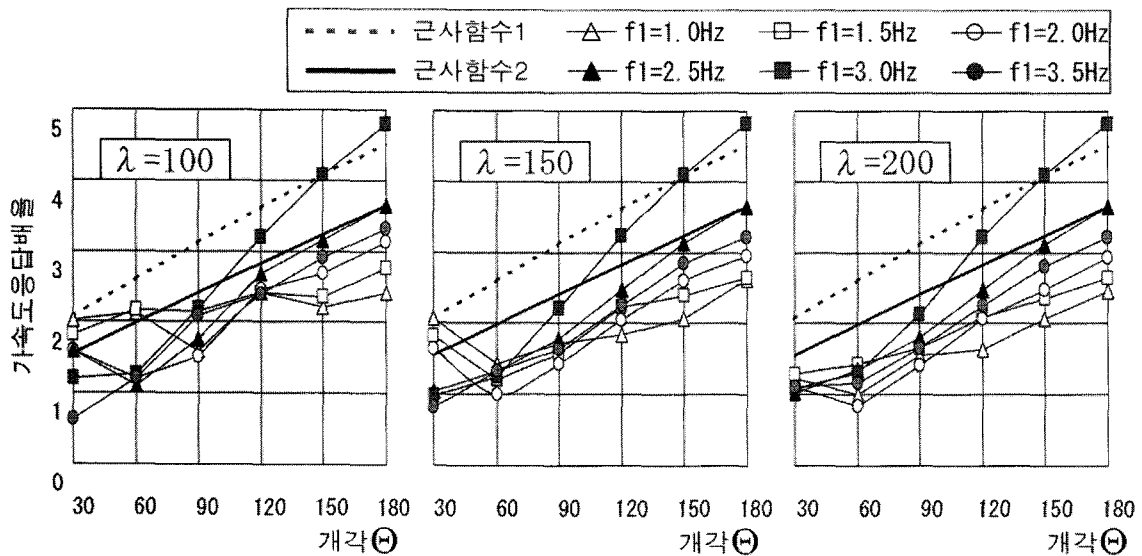
HH와 VH분포가 더해진 형태를 하고 있는 HV_H분포의 경우에는, HH분포에서 최대치를 보여주는 위치와 VH에서 최대치를 보여주는 위치가 중첩되는 영역이 존재하므로, HH, VH분포와 동일하게 전구간에서 최대치를 취한다.

수평·상하지진동의 동시입력에 대한 연직응답 HV_V분포의 경우, 정확하게 HV_V1과 HV_V2분포로 구분하기 어렵다. 지진동의 단독입력의 경우에는, 중앙의 값과 양측면의 값을 비교하여 중앙의 값이 큰 경우를 VV1분포, 양쪽의 값이 큰 경우를 VV2분포를 부르는 것이 가능하였으나, 동시 입력을 함으로 인하여 HV분포형이 가산됨으로써 VV1 및

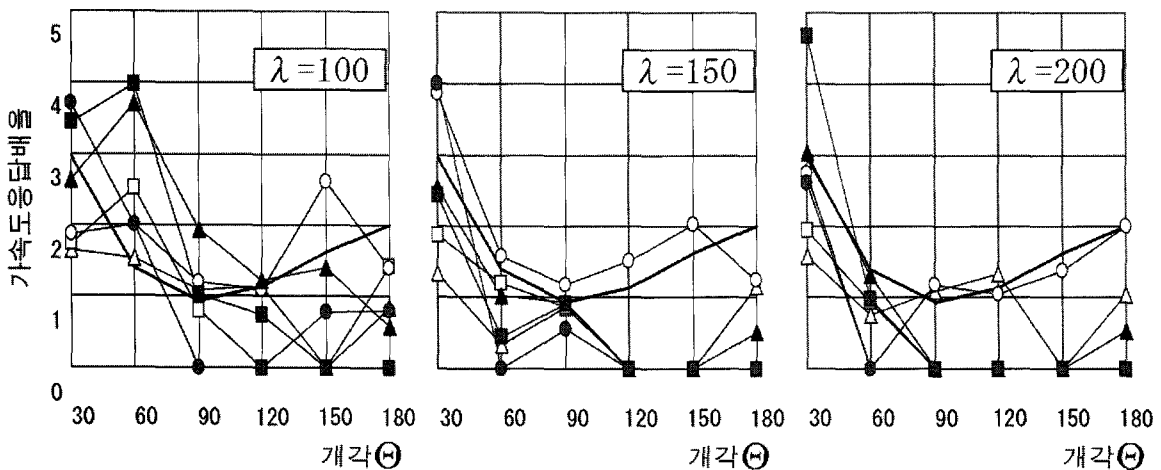
VV2분포의 어느쪽도 닮지 않는, 오히려 HV분포형에 닮은 분포형도 HV_V분포에 존재하기 때문이다. HV와 VV1분포가 더해진 경우, HV분포는 양측에서 최대값을 보여주고 중앙에서는 항상 0의 값을 가지고 있으며, VV1분포는 중앙에서 최대값을 보여주기 때문에, VV1분포형에 닮은 분포형과 HV분포에 닮은 분포형이 둘다 존재가능하다.

본 논문에서는, 편이성을 위하여, 아치의 정중앙절점 인근의 3절점 이내에서 최대값이 발생하는 경우 HV_V1분포라 하고, 그의 최대값을 취한다. 또한, 정중앙절점 인근의 3절점 이외의 위치에서 최대응답이 발생할 경우 HV_V2분포라고 하고, 그의 최대값을 취한다.

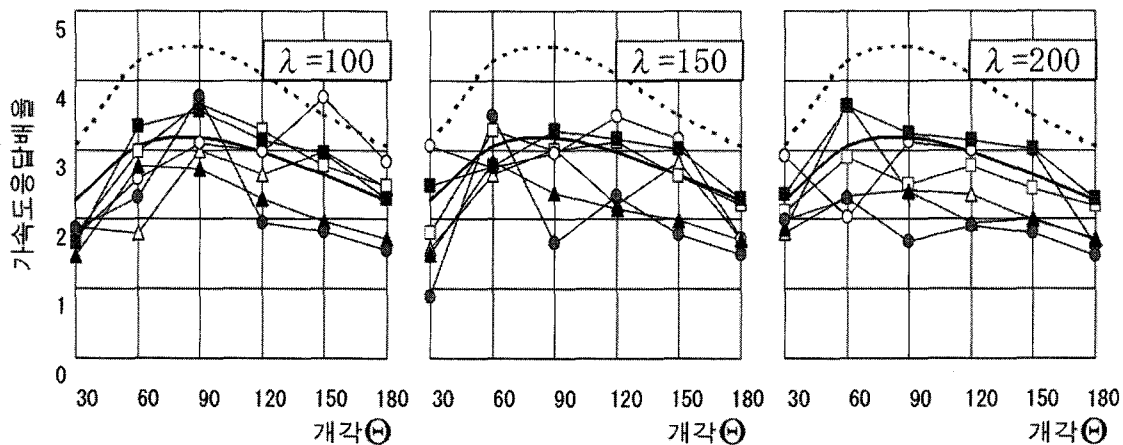
각 그림의 실선은, 4입력지진파×4판단조건에 의



〈그림 7〉 수평·상하지진동의 동시입력시의 수평응답최대치 HV_H,MAX



〈그림 8〉 수평·상하지진동의 동시입력시의 연직응답최대치 HV_V1,MAX



〈그림 9〉 수평·상하진동의 동시입력시의 연직응답최대치 HV_V2,MAX

한 16개의 분포 전체에 대한 최대응답치를 보여준다. 또한, 굵은 실선 및 점선은, 최대응답분포의 근사함수를 보여준다.

동시입력에 의한 절대가속도응답최대치는, 수평진동 단독입력에 의한 수평응답최대치 HH_{H,max}, 상하진동 단독입력에 대한 연직응답최대치 VV1_{max}, VV2_{max}와 기본적인특징은 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 그림으로부터, 동시입력에 대한 수평응답최대치(HH_{H,max})는, 개각θ가 커지면 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 겉보기세장비λ가 최대응답치에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 또한, HH_{V1,max}는 개각90°를 기준으로, 개각이 작아지면 급격히 응답최대치가 크게 되고, 또한, 개각이 커지면 완만히 증가하는 경향을 보인다. HV_V2,max는, 개각θ이 60°~120°에서 크게 되는 경향을 보인다. 겉보기세장비λ의 영향은 비교적 작음을 알 수 있으며, λ가 100, 150, 200으로 증가할 때, 응답의 최대치를 보여주는 각도가 60°에서 90°의 위치로 변화함을 알 수 있다.

6. 등가정적지진력의 설정

6.1 등가지진력설정에 있어서의 가정

운동방정식에서 감쇠력항을 소거하면, 관성력항을 하중항으로 둘 수 있고, 관성력항은 아래의 식과 같이 변형한다.

$$\text{관성력항} = mg \times \frac{\text{입력지진동의 가속도 최대값}}{g} \times \frac{\text{순간절대가속도응답분포}}{\text{입력지진동의 가속도 최대값}}$$

본 논문에서 구한 절대가속도응답배율분포는, 입력진동으로 기준화한 진도분포함수로 볼 수 있다. 따라서, 등가정적지진력은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

등가정적지진력(P)=

단위 길이당 중량(p)×진도(C)×진도분포함수(A)

본 논문에서는 가능한 간단한 정적진도분포의 모델화 및 정적지진력의 설정을 목표로하며, 아래와 같은 가정을 이용한다.

(1) λ가 200의 결과를 이용한다. 아치의 미관 및 경제성의 면으로부터, 실존하는 아치의 겉보기세장비λ는 200이상인 경우가 많다.

(2) A판정의 결과를 기준으로 한다. 가장 큰 응답을 보이는 응답의 그룹에 주목하며, 4차를 넘는 고차고유진동모드에 관한 응답은 무시하기로 한다.

(3) 수평·상하동시입력에 대한 연직응답은 HV_V1과 HV_V2의 두 모델로 표현한다.

(4) 수평·상하진동의 단독입력시의 진도분포함수 AHH와 AHV를 이용한다.2) 즉, PHH와 PHV를 이용한다. 첨부로 표시하였다.

6.2 등가정적지진력의 설정

상기 가정으로부터 얻어지는, HV_H HV_{V1}, HV_{V2}의 지진동의 단독입력에 대한 진도분포함수

를 이용하여 등가지진력을 표현한다. 본 논문에서는 수평·상하지진동의 동시입력시의 등가정적지진력을 구하는 방법으로, 단순히 수평지진동에 의한 지진력(PHH)과 상하지진동에 의한 지진력(PHV)을 더하는 방법과 PHH와 PHV의 제곱합의 평방근(root sum square(RSS))으로 구하는 방법의 2종류의 방법을 검토하였다.

▶가산에 의한 방법

$$P_{HV,H} = P_{HH} + P_{VH}, \quad P_{HV,V} = P_{HV} + P_{VV}$$

여기서, $(P_{HV,V1} = P_{HV} + P_{VV1}, \quad P_{HV,V2} = P_{HV} + P_{VV2})$

▶RSS에 의한 방법

$$P_{HV,H} = \sqrt{(P_{HH})^2 + (P_{VH})^2}, \quad P_{HV,V} = \sqrt{(P_{HV})^2 + (P_{VV})^2}$$

여기서, $(P_{HV,V1} = \sqrt{(P_{HV})^2 + (P_{VV1})^2},$
 $P_{HV,V2} = \sqrt{(P_{HV})^2 + (P_{VV2})^2})$

<그림 7>~<그림 9>에 2종류의 방법에 대한 결과를 나타내었다. 그림중의 점선으로 표시된 근사함수 1은 가산에 의한 방법에 따른 등가정적지진력을, 그림중의 굵은 실선으로 표시된 근사함수 2는 RSS법에 의한 방법에 따른 등가정적지진력을 나타낸다. 단, 단위길이당 중량(p)=1, 수평입력진도(C_{BH})=1, 상하입력진도(C_{BV})=1/2로 둔 등가정적지진력, 즉, 진도분포함수를 나타낸다. 그림들로부터, 가산에 의한 방법은 실제 응답보다 과다한 값을 보여주고 있고, RSS에 의한 방법으로 좋은 근사가 가능함을 알 수 있다.

7. 결 론

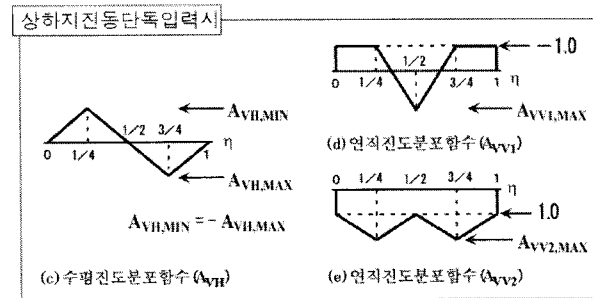
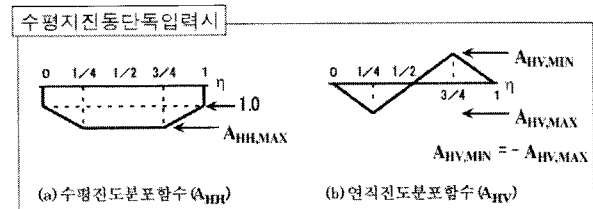
본 논문에서는 수평·상하지진동의 동시입력에 대한 순간가속도 응답배율의 특성을 고찰하였고, 지진동의 단독입력시의 등가정적지진력을 이용하여,

지진동의 동시입력에 대한 합리적인 등가정적지진력의 설정법을 제안하였다.

참고문헌

1. 矢花修一、石田勝彦、上下·水平地震荷重の設定法に関する検討、電力中央研究所報告、U92005、平成4年6月
2. 山田大彦、鄭讚愚, 아치의 지진시가속도응답분포특성(설계용 정적지진력의 제안), 일본강구조학회 연차논문보고집, 제8권, 2000. 11, pp293-300

* 첨부



$$(1/6 \leq \xi = \theta / 180^\circ \leq 1)$$

$$A_{HH,MAX} = 1 + 2.5\xi$$

$$A_{HV,MAX} = -A_{HV,MIN} = -5(\xi - 0.7)^2 + 2.5$$

$$A_{VH,MAX} = -A_{VH,MIN} = -(\xi - 1)^2 + 2$$

$$A_{VV1,MAX} = -29\xi^3 + 68\xi^2 - 47\xi + 12$$

$$A_{VV2,MAX} = 27\xi^3 - 52\xi^2 + 26\xi + 1$$