

# 장현보구조형식을 가지는 공간구조물의 정적지진하중 평가법에 관한 연구

## A study on the static seismic loads for the space structures of beam string structure

김 광 일\*                      정 찬 우\*\*                      강 주 원\*\*\*  
Kim, Kwang-il                  Jung, Chan-Woo                  Kang, Joo-Won

### 요 약

최근, 지진하중에 대한 대공간구조물의 응답특성에 관한 연구가 다수 수행되었으며, 라이즈/스팬비가 큰 지붕구조에 대하여서는, 수평지진입력에 대한 역대칭모드의 증폭이 지배적으로 됨이 지적되었다. 본 연구에서 제안하는 정적지진하중평가법에서는, 라이즈가 있는 지붕구조의 내진설계를 수행함에 있어, 허용응력도설계법을 따르며, 그림1과 같이 설계용전단력을 지붕면에 따라 추가하는 정적평가법을 채용하고 이를 정적지진하중평가법이라 부르기로 한다. 본 논문의 구성으로서는, 정적평가법의 개념 및 정적설계식의 유도과정을 나타내고, 라이즈/스팬비가 서로 다른 지붕구조물을 대상으로 하여, 본 평가법에 의한 결과와 정적응답해석을 수행한 결과를 비교하고, 정적평가법의 타당성에 대하여 검토한다.

### Abstract

Recent years, the response characteristics of large space structures have been studied. Then, for the large space structures with large rise-span ratio, it is clarified that the anti-symmetric mode are representatively amplified. That means the static seismic load for general ramen structure is not suitable for the space structure.

In this paper, we propose static seismic loads for space structures and its concept. And for the space structures of beam string structures, execute the time history analysis and quasi static analysis and compare the results of them. From the results, we can prove the validity of static seismic load for space structure.

키워드 : 장현보구조, 공간구조, 정적지진력

Keywords : beam string structure, space structure, static seismic force

## 1. 연구의 배경 및 목적

최근, 지진하중에 대한 대공간구조물의 응답특성에 관한 연구가 다수 수행되었으며, 라이즈/스팬비가 큰 지붕구조에 대하여서는, 수평지진입력에 대한 역대칭모드의 증폭이 지배적으로 됨이 지적되었다.<sup>1)</sup> 이는 일반적인 라멘형식의 중층구조물을 대상으로 하는 정적설계하중은, 라이즈/스팬비가 큰 지붕구조

에 대하여서는 적합하지 않다는 것을 의미한다.

본 연구에서 제안하는 정적지진하중평가법에서는, 라이즈가 있는 지붕구조의 내진설계를 수행함에 있어, 허용응력도설계법을 따르며, 그림 1과 같이 설계용전단력을 지붕면에 따라 추가하는 정적평가법을 채용하고 이를 정적지진하중평가법이라 부르기로 한다.

본 논문의 구성으로서는, 정적평가법의 개념 및 정적설계식의 유도과정을 나타내고, 라이즈/스팬비가 서로 다른 지붕구조물을 대상으로 하여, 본 평가법에 의한 결과와 정적응답해석을 수행한 결과를 비교하며, 정적평가법의 타당성에 대하여 검토한다.

\* 정회원, 영남대학교 건축학부 석사과정  
TEL :010-3100-8482

E-mail : kwang22@ynu.ac.kr

\*\* 정회원, 경북대학교 건설공학부 박사후과정, 공학박사

\*\*\* 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사

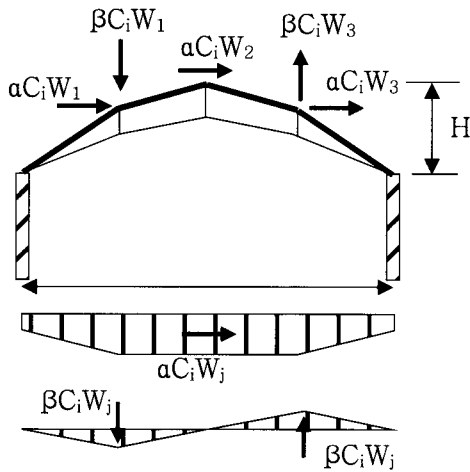


그림 1. 정적평가법

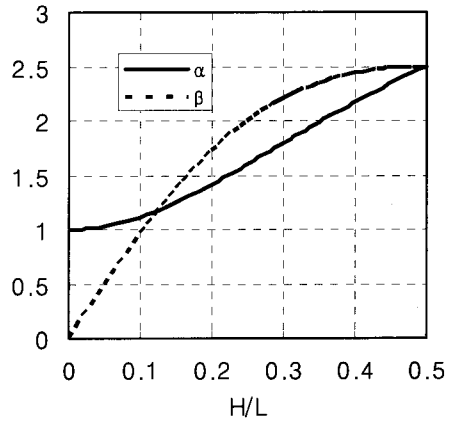


그림 2. 라이즈비와  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 관계( $R_t=1$ 의 경우)

## 2. 정적지진하중평가법의 Concept

라이즈비가 있는 지붕구조가 하부구조 없이 단독으로 존재할 경우에 있어, 대칭모드 및 역대칭모드가 존재한다. 이때 역대칭 모드에 주목하여 보면, 역대칭 모드에 관한 응답배율은 지붕구조의 고유주기가 0.1~0.6초에 있다고 가정하면, 최대 4배정도(감쇠정수 0.02의 경우)로 예상되어 진다. 이에, 라이즈가 있는 지붕구조에 대하여, 지붕면에 따라 주어지는 질량에 수평 및 역대칭연직하중을 부가하여, 응답평가를 수행하는 것으로 한다.

그림 1에 나타낸것과 같이, 수평하중은 지붕면에 따라 수평방향으로 재하하고, 연직하중은 역대칭방향으로 재하한다.

$$\text{수평하중} = aC_iW_j$$

$$\text{연직하중} = \beta C_iW_j$$

여기에서,

$C_i$ : 지붕지지점레벨에 대한 설계용전단력계수

$$\text{수평방향증폭율 } \alpha : A \sin^2\theta + \cos^2\theta \quad (1)$$

$$\text{연직방향증폭율 } \beta : (A + 1) \cos\theta \sin\theta \quad (2)$$

$$\text{증폭율 } A : 4 \times R_t \quad \tan\theta = 2H/L$$

$H/L$  및  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 관계를 그림 2에 나타내었다. 또한, 지붕지지레벨의 설계용전단력계수  $C_i$ 에 대하여서는, 지붕구조물의 특성을 고려하여, 지진력수평분포  $F_x$  <sup>2)</sup>등을 참고로 적절한 설정을 하도록 한다.

## 3. 정적설계식의 유도

식(1)의 수평방향증폭을 및 식(2)의 연직방향증폭을 식을 구성하는 수법으로서 다음과 같은 개념으로 설정된다.

수평지진입력에 대하여 역대칭모드가 증폭되는 경우, 진동방향은 그림 3a와 같이 임의의 방향을 가지게 된다. 이를 설명하는 데 있어, 수평지진동가속도에 의해 발생하는 1/4분할점의 질량에 작용하는 최대수평하중  $P$ 를 기준치로서 이용한다.

수평하중  $P$ 를 면내성분과 면외성분으로 분할하고, 면외성분이 역대칭모드의 고유주기에 대하여 응답증폭한다고 생각한다. 면외방향증폭율을  $A$ , 면내방향증폭율을  $B$ 라고 두면, 증폭후의 면외·면내하중은 각각 아래와 같이 된다.(그림 3-b)

$$\text{면외하중} : AP \sin\theta$$

$$\text{면내하중} : BP \cos\theta$$

일반적으로, 면내고유주기는 면외고유주기에 대하여 극히 짧으므로,  $P$ 에 의해 발생하는 면외, 면내진동은 위상차를 가지고 조합된다고 생각할 수 있다.(그림 3-c)

또한, 면외하중, 면내하중을 각각 수평성분과 연직성분으로 분해하면 다음과 같다.

$$\text{면외하중} : \text{수평성분} : AP \sin^2\theta$$

$$\text{연직성분} : AP \sin\theta \cos\theta$$

$$\text{면내하중} : \text{수평성분} : BP \cos^2\theta$$

$$\text{연직성분} : BP \cos\theta \sin\theta$$

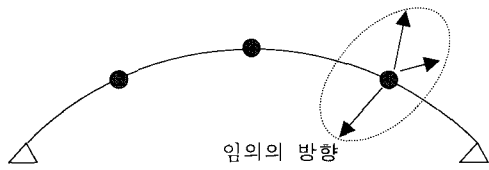


그림 3-a. 역대칭모드시 진동방향

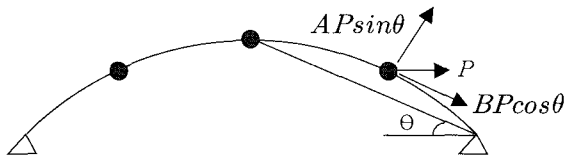


그림 3-b. 최대수평하중의 분해

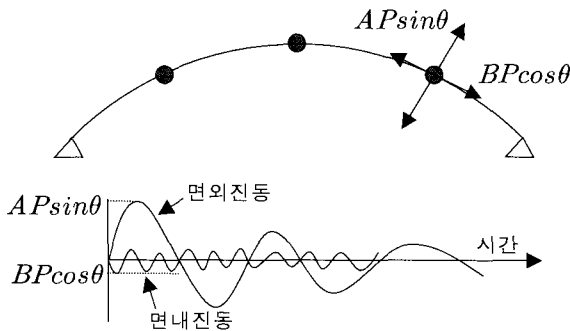


그림 3-c. 진동응답의 이미지

위상차를 고려하여, 최대응답하중으로서 수평성분, 연직성분의절대치합을 취하면, 다음식과 같이 된다.

$$\text{수평성분} : (A \sin^2 \theta + B \cos^2 \theta) P$$

$$\text{연직성분} : (A + B) \sin \theta \cos \theta P$$

여기서  $P$ 는 설계용전력계수  $C_i$ 에 지붕각부의 중량  $W_j$ 를 곱한 값으로 한다.

면외방향의 증폭을  $A$ 는 감쇠 0.02에 대한 지진파의 응답스펙트럼 분포에 의해 최대값을 4.0하고, 지진파스펙트럼을 참고로, 그림 4와 같은  $R_t$ 계수를 채용한다.

면내성분에 대하여서는, 강성이 충분히 크다고 생각될수 있으므로,  $B = 1.0$ 으로 둔다.

$R_t$ 계수를 구하기 위한 지붕의 역대칭 모드는 고유치해석등에 의하여 구한다.

지지점의 연직반력의 산정에 관하여서는, 수평하중과 연직하중이 조합한 경우에 더하여, 수평하중 또는 연직하중이 단독으로 작용하는 경우의 반력도 고려한다.

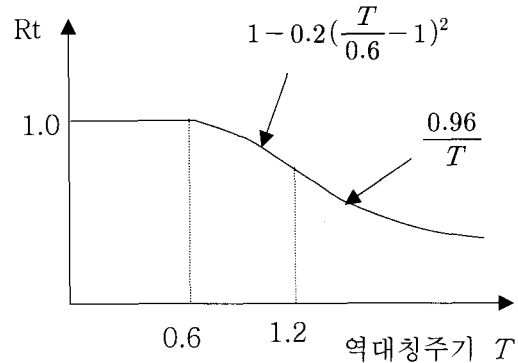


그림 4. 역대칭 주기  $T$ 에 대한  $R_t$ 계수 분포

지반으로부터 지붕지지점까지의 응답치는, 지붕 중량을 지지점레벨에 도입시킨 하부구조의  $C_i$ 분포에 의한 것으로 한다. 하부구조의 고유주기산정용의 건물높이는 지지점의 높이로 하며, 지지점으로부터 지붕구조 각부에서의 응답증폭은 지붕구조 단독의 고유주기를 별도로 산정하여, 앞에서 논한 증폭계수에 의한 평가를 하는 것으로 한다.

#### 4. 해석모델

본 연구에서는 지붕구조물의 해석모델로서 장현보구조형식을 대상으로 하였다. 정현보구조는 고유진동에 있어 역대칭모드가 대칭모드에 비해 크게 증폭되며, 라이즈비의 영향을 받기 쉬운 것으로 관찰된다. 이에 본 검토에 사용된 모델은 그림 5와 같은 모델로서, 스패인 20m, 라이즈비/스패인비H/L을 0.1~0.5까지 0.1단계로 검토하였다. 총 5type의 모델을 검토하였다. 중량은 고정하중을  $1.0 \text{ kN/m}^3$ 으로하여 질점에 환산하고, 구성부재는 응력-변형을 고려하여 표준적인 부재를 설정하였다. 상현재는 2H-244×175×7×11의 부재를 사용하였으며, 하부 인장재로서는  $2 \times \phi 19 (A=5.7 \text{ cm}^2)$ 의 PC강봉형식 부재를 사용하였다.

모든 설정된 모델에 있어, 역대칭모드가 탁월하게 되며, 스패인 20m모델에서는 1차고유주기가 0.35, 0.42, 0.51, 0.64, 0.78sec와 같이, 라이즈비가 커질수록 고유주기가 길어지며, 하부구조에 대한 구조물의 상대수평변위가 크게된다.

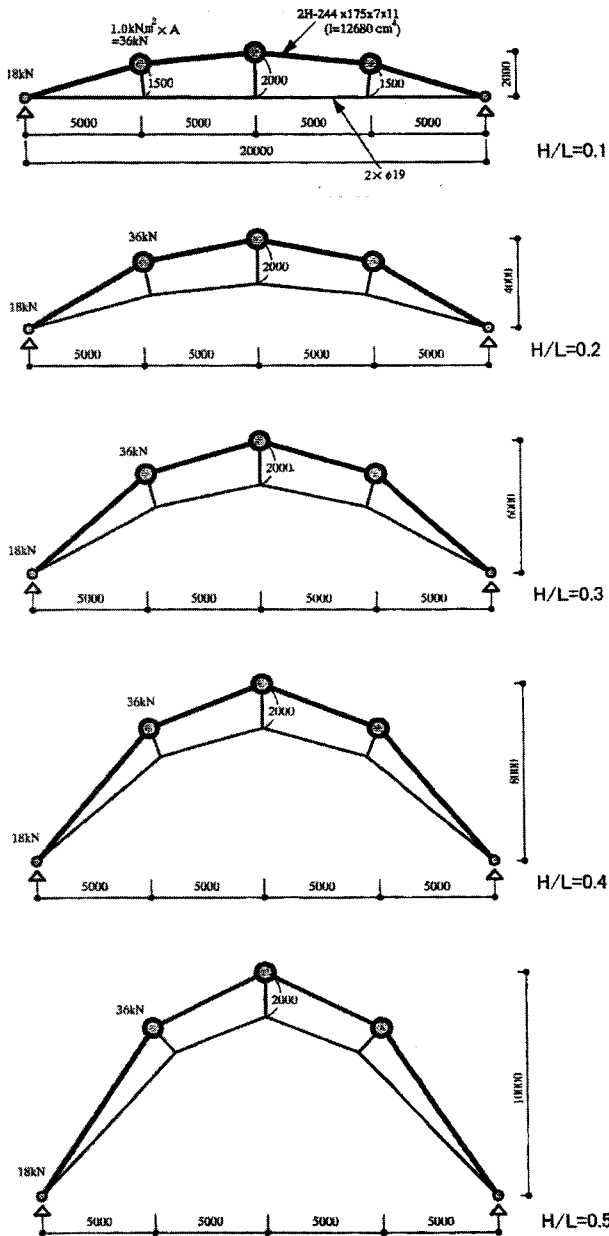


그림 5. 해석모델

## 5. 지진응답평가

### 5.1 동적응답해석

모든 설정된 모델에 수평지진입력시 시각이력 동적응답해석을 수행하고, 증폭되는 지붕구조물의 수평·연직진동을 고찰한다. 해석에 사용된 지진파의 제원은 아래 표 1과 같으며, 지지점레벨에서 최대속도 30m/sec로 기준화하여 입력한다. 이 지진레벨은

$C_d=0.3$ 에 상당한다. 감쇠 $h$ 는 0.02(강성비레형)으로 하였다.

표 1 : 동적응답해석용 지진파

지진파	최대가속도(cm/sec <sup>2</sup> )	해석시간(sec)
El Centro NS	306.5	54
Taft EW	298.1	54
Hachinohe NS	198.1	40

시각이력 응답해석의 결과로부터 얻어진 각 모델에 있어 상현재의 최대응답변위, 최대모멘트, 최대응답수평반력 및 최대연직반력을 표 2에 나타내었다.

라이즈가 높아질수록 절대변형량( $d$ )이 커지고, 또한 수평변형량( $x$ )이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이에 반해 라이즈/스팬비가 0.1의 모델에서는 수평지진동에 대한 응답변형 및 응력은 아주 작은 값을 나타내며, 질량의 진동방향은 연직방향이 주를 이루고 있다.

### 5.2 정적평가법에 의한 변형·응력

본 논문의 2장에서 제시한 것과 같이, 수평·연직하중을 가하였을 때의, 변형, 상현재의 최대응력, 지지부수평반력 및 연직반력을 표 3에 나타내었다. 각 모델에 있어 설정된 정적하중에 의하여 발생하는 역대칭변형 및 상현재의 휨응력은, 동적응답해석결과와 잘 대응하고 있음을 알 수 있다.

### 5.3 정적설계법 및 동적응답해석결과의 비교

설계용전단력에 의한 정적평가법과, 동적응답해석의 결과를 비교함으로써 본 정적설계법의 타당성을 검토한다.

각 지진파에 대한 상현재 1/4위치에 대한 최대변형, 최대휨모멘트, 지지점 최대수평반력 및 최대연직반력을 그림 6 ~ 그림 9에 나타내었다. 각 그림에 있어, 수평축은 라이즈/스팬비를 나타낸다. 그림중, 심볼 ● ■ ▲을 가지는 실선은 동적응답해석에 의한 각 지진파의 최대응답치를 나타내며, 심볼없는 실선은 2장에서 정의한 정적설계하중에 의한 응답

을 나타낸다.

입력지진파의 차이에 의하여 각 모델에 있어 해석결과가 분산되어 나타남에도 불구하고, 변위 및 모멘트는 라이즈/스팬비가 증가함에 따라 커지는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

또한, 각 그림에 보여주는 것과 같이 정적설계법에 의한 응답치가 동적설계법에 의한 응답치를 약간 의 여유를 가지고 상회하고 있음을 알 수 있으며,

이는 본 정적설계법의 타당성을 나타낸다고 할 수 있다.

## 6. 정리

본 논문에서는 먼저, 역대칭모드가 크게 증폭되는 공간구조물을 대상으로, 정적지진하중평가법을 제시하였다. 장현보구조형식의 서로 다른 라이즈/스

표 2 : 동적응답해석 결과

라이즈/스팬비 $H/L$			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
역대칭 주기 $T1(sec)$			0.35	0.42	0.51	0.64	0.78	
응답변위 (cm)	El Centro	중앙	x	0.13	0.57	2.05	3.40	4.66
			x	0.19	0.85	3.08	5.09	6.97
		1/4	y	0.66	1.41	3.41	4.37	4.10
			d	0.69	1.65	4.60	6.71	8.09
	Taft	중앙	x	0.19	0.99	1.56	3.00	15.10
			x	0.28	1.17	2.33	4.50	7.59
		1/4	y	0.92	2.45	2.65	3.74	5.02
			d	0.96	2.85	3.53	5.85	9.10
	Hachinohe	중앙	x	0.19	0.31	1.76	3.38	7.97
			x	0.29	0.46	2.64	5.07	11.93
		1/4	y	0.88	1.12	2.92	3.71	7.97
			d	0.93	1.21	3.94	6.28	14.35
휨모멘트 (kNm)	El Centro		20.7	41.4	91.5	106.0	102.0	
	Taft		28.7	71.7	70.9	90.9	111.0	
	Hachinohe		29.9	32.8	81.7	102.5	107.2	
수평반력 (kN)	El Centro		21.0	22.9	33.7	29.8	23.6	
	Taft		21.5	26.1	20.1	27.6	25.4	
	Hachinohe		15.5	17.1	21.9	27.8	25.4	
연직반력 (kN)	El Centro		5.0	6.1	8.8	12.2	13.7	
	Taft		5.9	7.7	7.9	12.0	15.3	
	Hachinohe		5.3	4.2	5.4	10.7	21.9	

표 3 : 정적응답해석 결과

라이즈/스팬비 $H/L$			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
응답변위 (cm)	중앙	x	0.24	1.06	2.65	5.29	9.03
		x	0.37	1.59	3.97	7.91	13.65
	1/4	y	1.21	2.63	4.40	6.58	9.13
		d	1.27	3.07	5.93	10.29	16.42
휨모멘트(kNm)			38	77	118	159	199
수평반력(kN)			29	34	40	46	50
연직반력(kN)			5	9	12	13	20

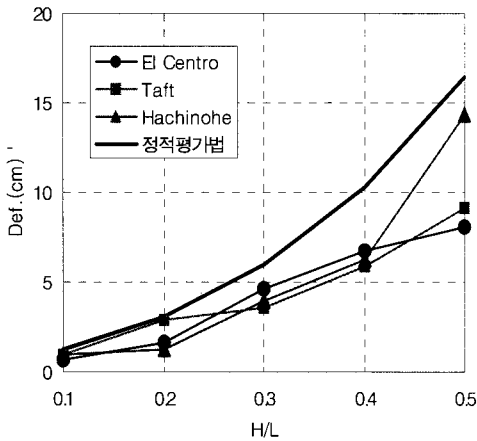


그림 6 상현재의 비대칭응답변형

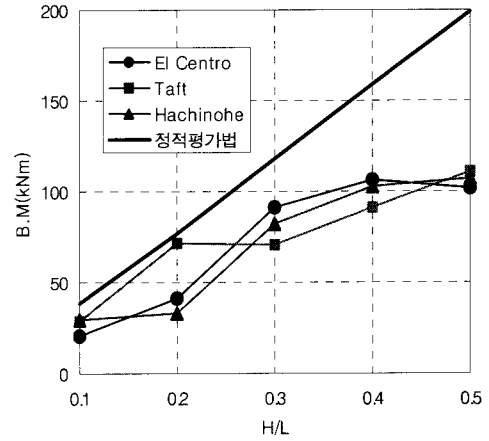


그림 7 상현재의 최대 휨 모멘트

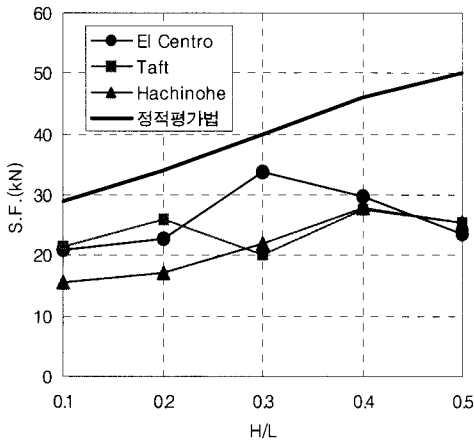


그림 8. 지지점 수평전단력

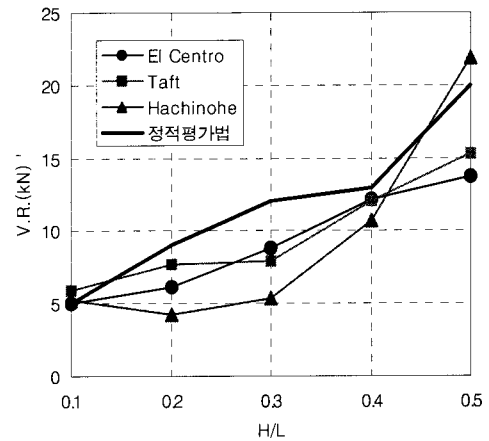


그림 9. 지지점 수직전단력

팬비율 가지는 공간구조물을 대상으로 하여, 동적 해석 및 정적해석을 수행하고 최대변형, 최대모멘트, 수평 및 수직전단력을 비교하였다. 이를 통하여, 본 논문에서 제시한 정적지진력평가법의 타당성을 검증하였다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 연구개발사업의 연구비 지원 (과제번호# 06 건설핵심B03)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 鄭讚愚、山田大彦、アーチの地震時加速度応答分布特性 (設計用靜的地震力の提案), 日本鋼構造學會 年次論文報告集, 第8卷, 2000. 11, pp293-300
2. 건축구조 설계기준 및 해설, 대한건축학회, 2006, pp120