

공간구조물의 성능기초 내진설계에 관한 기초연구: 강구조 골조막 구조의 탄소성 지진응답특성

A Fundamental Study of Performance Based Seismic Design on the Large Span Structures: The Characteristics of Elasto-Plastic Earthquake Responses of a Steel Frame with Membrane Roof

中澤祥二* 鄭明採** 加藤史郎*** 吉野達矢**** 小田憲史****
Nakazawa, Shoji Cheong, Myung-Chae Kato, Shi Yoshino, Tatsuya Oda, Kenshi

요약

공간구조물의 성능기초 내진설계를 위한 기초연구의 하나로 강구조 골조막 구조의 탄소성 지진응답 특성을 분석하였다. 하부 골조의 가새의 선행좌굴을 유도하여 상부예의 지진 에너지 전달을 저감할 수 있음을 보여주고 있다.

Abstract

The characteristics of elasto-plastic responses of a gymnasium building which is a steel braced frame with membrane roof is discussed as a basic research on the performance based seismic design of large span structures, in this paper. Under the strong earthquake motions, the formation of plastic hinges on braces attached by the bottom frame make reduce down the stresses and displacements of upper structures, and vertical acceleration of the membrane is tend to increase but maximum response of strain and corresponding stresses are tend to be reduced.

키워드 : 성능기초 내진설계, 탄소성응답, 소성힌지, 대공간 구조

Keywords : Performance based seismic design, Elasto-plastic responses, Plastic hinge, Large span structure

1. 서론

최근 공간구조물의 내진설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 내진설계 기준의 세계적인 추세는 종전의 요구조건 규정형 내진설계에서 성능 규정형 내진설계로 변하고 있다고 할 수 있다. 예를 들면, 미국의 경우 FEMA(Federal Emergency Management Agency)의 FEMA 273(1997), ATC(Applied Technical Council)의 ATC 40(1996), SEAOC(Structural Engineers Association of California)의 Vision 2000등이 제안

되어 있으며 건축물에 대한 성능목표가 건물의 강성과 강도, 비 구조 부재의 손상과 보수의 필요성, 인명 손상의 가능성에 대하여 규정하고 건물의 용도와 중요성에 따라 지진동 레벨과 충족하여야 할 성능 목표(내진 성능 매트릭스가 제안되어 있다 [실제로는 FEMA 349 (2002), ATC-58의 규정에서 정하고 있으며 LCC, 위험도 분석(비용편익 해석, 투자 회수 해석으로부터 성능목표를 규정하는 등)으로 전개되기도 함]. 일본에서는 건축기준법의 개정에 따라 종전의 허용 응력도 계산과 시각이력응답 계산등에 의한 구조계산에 추가하여 구조성능을 기본으로 하는 한계내력 계산¹⁾과 에너지법이 고시화 되어 있다.

성능 규정형의 내진설계 기준에서는 주어지는 외력 지진동에 대해 설계대상 구조물이 어떻게 거동하며, 어느 정도의 손상을 입을 것인가를 가능한 정확하

* (일본)豊橋技術科学大学 建設工学系 助手, 博士(工学)

** 정희원, 전주대학교 건축공학과 부교수, 공학박사
Tel : 063-220-2720

E-mail : syrius@jeonju.ac.kr

*** (일본)豊橋技術科学大学 建設工学系 教授, 工博

****(일본)太陽工業株式会社 空間技術研究所, 博士(工学)

게 추정할 필요가 있다. 보통의 중층 골조 구조물 (빌딩등)에서는 최대 층간 변형각이 손상을 나타내는 지표가 될 수도 있으므로 최대 층간 변형각을 정확하게 구하는 일이 아주 중요하다. 일반적으로는 탄소성 시각이력 응답해석의 정확도가 가장 중요하다고 생각되나, 실제의 내진설계에서는 등가 선형화법과 응답스펙트럼을 조합하여 최대변형을 추정 하는 방법 (CSM: Capacity Spectrum Method)등이 이용 된다.

한편 공간구조물의 성능 규정형 내진설계의 현상을 살펴보면, 앞에서 설명한 성능 규정형 내진설계는 원래 중층 골조구조(縱型)를 대상으로 하고 있어, 공간구조와 같은 장 스펜(橫型)구조에 적용할 때에는 상당한 주의가 요구된다. 일반적인 층상 구조물에 비해 장 스펜 구조는 1) 층상 구조와는 달리 강막 가정에 의한 층의 개념을 적용할 수 없고, 2) 수평 지진동에 의한 상하방향 지진력의 설정법이 제안되어 있지 않으며, 3) 비교적 고차 모드가 나타난 등의 특징이 있다. 이러한 특징을 고려하여 공간 구조물(학교체육관)의 성능목표와 내진성능 매트릭스, 손상을 나타내는 물리량, 설계 기준 등을 논의할 필요가 있다.

공간구조의 성능 규정형 설계에 필요 불가결한 지진응답의 추정법으로는 하부구조가 항복하는 래티스 돔⁵⁾을 대상으로 하여 등가 선형화 방법을 이용한 응답스펙트럼 해석법⁶⁾과 Push-over해석을 이용한 응답 추정법^{4,7,8)}에 관한 연구가 이루어지고 있다. 참고 문헌 8)에서는 모드 적응형 비선형 증분해석을 이용하여 래티스 돔의 응답성상에 나타나기 쉬운 2개 모드의 영향을 고려한 돔의 한계내력 계산법을 보여주고 있다.

시각이력 응답해석을 이용하지 않은 응답 추정법은 돔을 중심으로 이용되고 있는 반면, 비교적 규모가 작고 자주 건설되는 직사각형 평면형상을 가진 공간 구조에 대한 응답성상의 분석과 응답 추정법에 관한 연구는 그리 많지 않다.

본 연구에서는 직사각형 평면형상을 가진 골조막 구조에 한정하여, 탄소성 시각이력 응답해석을 이용하여 응답성상을 분석하고 이와 함께 push-over 해석에 기초한 응답 추정법을 제시하며 그 적용성에 관하여 검토한다. 먼저 해석모델, 응답해석의 기초

이론을 설명한다. 골조막 구조의 일례로서 직사각형 평지붕건물의 체육관²⁾을 설정하고, 안전한계에 상당 하는 지진동이 작용하는 경우의 지진응답 성상을 분석 한다. 그 다음에 특히 참고문헌 3)에서 충분히 검토가 되지 못했던 하부구조의 소성화가 상부지지 골조의 응답에 미치는 영향(하부 구조의 항복에 의한 상부 구조의 응답저감 효과)를 분석한다.

2. 해석모델

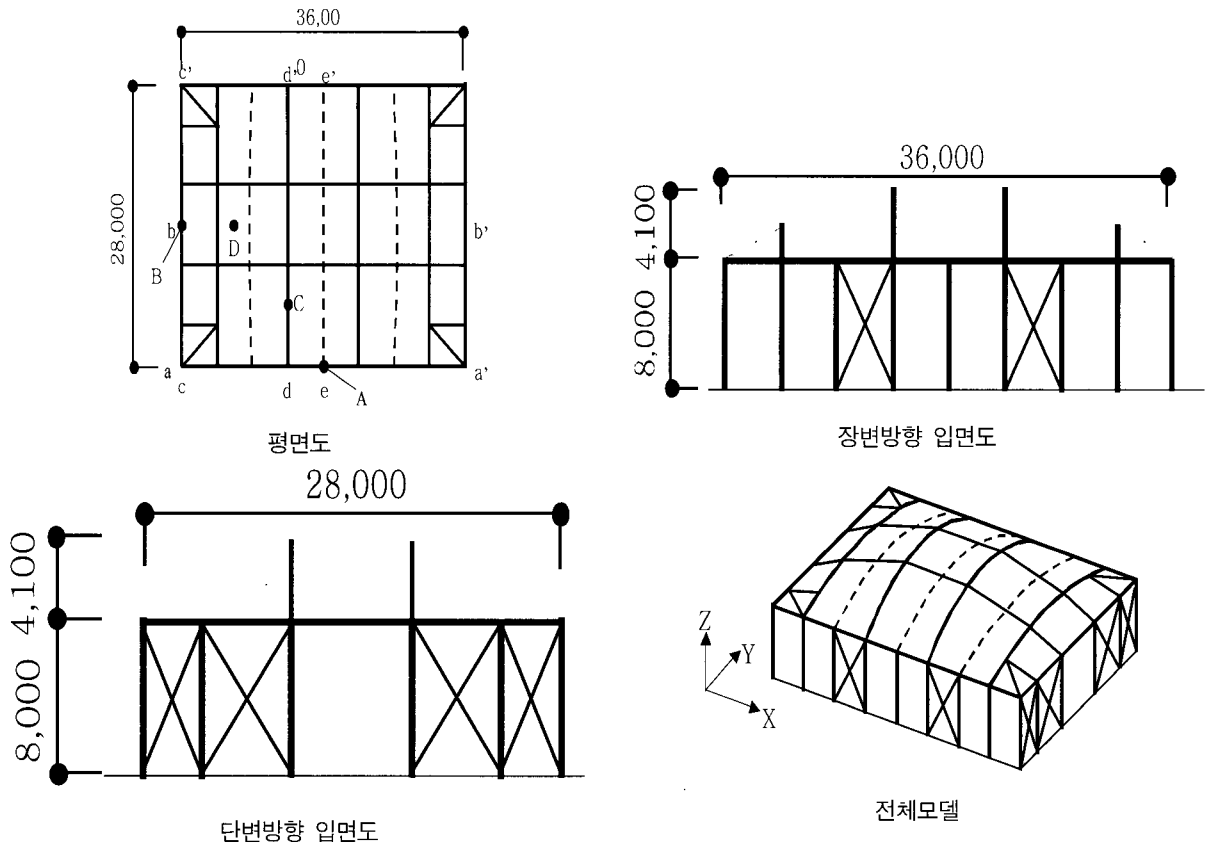
2.1 대상구조물의 개요

해석대상 구조물은 참고문헌2)와 마찬가지로 단변 방향 28m(=2.00m×14), 장변 방향 36m(=2.25m×16)인 직사각형 지붕을 가진 체육관으로 한다. 지붕은 강관으로 구성되는 아치 보와 중앙을 케이블로 누른 골조막 구조로 구성되며, 아치 보는 하부 주두에서 강접합되어 있다. 아치 보와 아치간 긴결 보는 핀 접합되어 있다. 해석모델을 <그림 1>에 표시하고 주요 부재의 단면은 <표 1>에 표시하였다.

아치 보 절점의 질량 m_b 는 500kg(250kg/m)로 가정 하였다. 연보(緣梁)상 절점의 질량 m_s 는 하부구조의 질량도 고려하여 절점당 3,000kg으로 하였다. 막 재료의 질량을 1.5kg/m²로 하고 막면상의 절점에는 $m_m=6.75kg$ 의 질량을 가정하였다. 아치 보 절점의 질량 구조물 전체의 질량은 122.7×10³kg로 한다. 막면의 전질량은 1.72×10³kg (전체질량의 1.4%),연보를 포함한 상부골조가구의 전질량은 56.0×10³kg(전체 질량의 45.6%), 하부 구조의 전질량은 65.0×10³kg(전체질량의 53.0%)이다. <그림 2>에 질량의 개요를 표시하였다.

2.2 하부구조

하부구조는 단변과 장변의 양방향으로 가새가 설치된 높이 8m인 강구조로, 주각은 고정지지로 가정 한다. 가새의 탄성계수E는 205GPa라고 가정한다. 하부 구조의 소성화가 상부구조(아치 보와 막면)에 미치는 영향을 검토하기 위하여 가새의 항복 층전단력 계수 α_{By} 를 해석변수로 한다. 또 가새의 이력은 이선형(bi-linear)으로 가정하고, 2차 강성비



<그림 1> 해석모델

<표 1> 주요부재 단면

부위	단면
아치 보	$\phi 457.2 \times t19.0$
아치간 긴결보	$\phi 139.8 \times t6.6$
상부 보(緣梁)	H600×300×16×20
기둥	H300×300×10×15

<표 2> 하부구조 가새의 단면적과 항복응력도

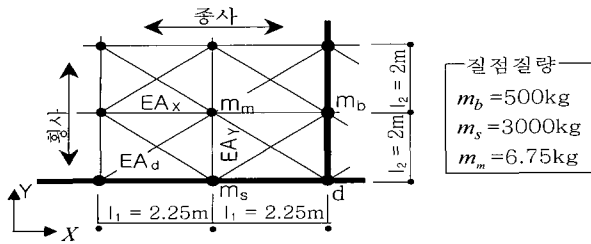
α_{By}	X방향 브레이스		Y방향 브레이스	
	단면적 [cm ²]	항복응력도 [MPa]	단면적 [cm ²]	항복응력도 [MPa]
0.2	2.607	235.2	1.221	235.2
0.3	3.910	235.2	1.831	235.2
0.4	5.213	235.2	2.441	235.2
∞ (탄성)	3.910	∞	1.831	∞

(초기 강성에 대한 2차 강성의 비)는 0.01로 가정한다. 하부구조전체의 2차 구배는 보 기둥 가새의 강성에 따른다. 본 연구에서는 $\alpha_{By} = 0.2, 0.3, 0.4, \infty$ (탄성)로 가정한다. 또 큰 지진동이 작용하는 경우의 지진응답성상을 분석한다. α_{By} 에 대응하는 가새의 단면적을 <표 2>에 나타내었다.

2.3 막면의 모델화

대상 구조물의 막 재료는 A종 막 재료이다. 참고 문헌 2)는 막면의 모델화가 고유진동해석에 미치는 영향을 분석하고 있어 「케이블 치환모델」로 막의 동적 특성을 충분한 정확도로 표현할 수 있음을 보여 주고 있다. 본 연구에서도 막면의 모델화는 「케이블 치환모델」¹¹⁾을 채용한다. <그림 2>에 막재의 등가 케이블 배치도를 표시하였다. 해석에서 사용한 막의 강성과 치환 케이블의 등가 신장강성을 <표 3>에 표시 하였다.

치환한 케이블의 초기장력은 참고문헌 2)와 같은 방법으로 산정한다. 본 연구에서는 막면의 설계용 초기장력은 종사 및 횡사 공히, 2.0kN/m으로 하고 X방향(횡사방향)케이블의 초기장력은 4.0kN, Y방향(종사방향)의 초기장력은 5.0kN으로 각각 설정하였다. 한편 경사 케이블의 초기장력은 1.0kN으로 하였으며 누름 케이블의 초기장력을 20kN으로 설정하였다. 가정한 초기장력을 기초로 형상해석을 수행



<그림 2> 등가 케이블의 배치와 질점의 질량

<표 3> 케이블 치환 모델의 등가신장 및 강성

	막과 누름 케이블의 강성	케이블의 등가신장 강성
X방향 케이블	막의 종사방향 $E_{t종} = 1180\text{kN/m}$	$EAX = E_{t종} \times l_2 = 2360\text{kN}$
Y방향 케이블	막의 횡사방향 $E_{t횡} = 962\text{kN/m}$	$EAY = E_{t횡} \times l_1 = 2165\text{kN}$
경사방향 케이블	막의 전단강성 $Gt = 66.6\text{kN/m}$	$EAd = 427\text{kN}$
누름 케이블 (30φ)	$E = 140\text{ kN/mm}^2$ $A = 438\text{ mm}^2$	좌동

하고 막면의 초기형상을 결정하였다.

2.4 수평방향의 입력지진동

하부구조의 변형과 소성화 정도는 입력 지진동의 크기와 관련이 있다. 본 연구에서는 지진동의 세기를 λ 로 표시하고, 일본 국토교통성의 고시(告示)에서 정하고 있는 손상한계변위의 검증에 사용되는 지진동 ($\lambda=1.0$)을 기본으로 하여 손상한계 레벨의 5배를 안전한계레벨의 지진동($\lambda=5.0$)으로 한다. 세기가 λ 인 지진동의 지표에서의 설계용 절대가속도 응답 스펙트럼 S_a 는 다음 식으로 정의된다.

$$S_a(T, h) = \lambda \times S_{a0}(T, h_0) \times F_h(h) \times G_s \quad (1)$$

$$S_{a0}(T) = \begin{cases} 3.2 + 30T & \dots & T < 0.16s \\ 8 & \dots & 0.16s \leq T < 0.64s \\ 5.12/T & \dots & 0.64s \leq T \end{cases} \quad [\text{m/s}^2] \quad (2)$$

여기서 $S_{a0}(T, h_0)$ 는 감쇠정수 $h_0=5\%$ 인 해방공학적 기반 면에서의 손상한계레벨 산정용 가속도 응답 스펙트럼을 표시한다. 표층지반에 따른 증폭계수 GS 는 (3)식의 간이법⁹⁾에 의한 제2종 지반용 증폭계수를 채용한다.

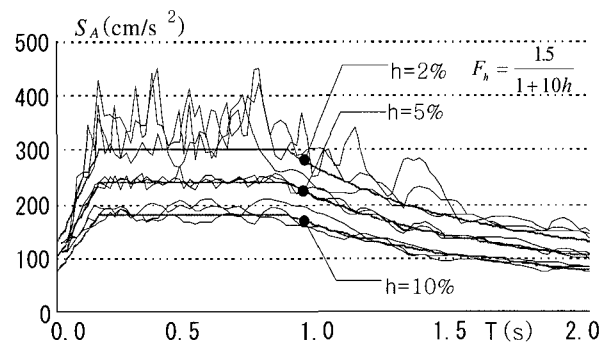
$$G_s = \begin{cases} 1.5 & \dots & T \leq 0.64s \\ 1.5(g_v/0.64) & \dots & 0.64s \leq T < T_u \\ g_v & \dots & T_u \leq T \end{cases} \quad (3)$$

단, $T_u = 0.64(g_v/1.5)$ 로, 제2종 지반의 경우 g_v 는 2.025를 사용한다. 또 감쇠에 따른 가속도 응답 스펙트럼의 저감율 F_h 는 감쇠정수 h 의 함수로 다음 식으로 주어진다.

$$F_h(h) = \frac{1.5}{1+10h} \quad (4)$$

시각이력 응답해석에 필요한 모의 지진동은 위상각에 기록지진동을 이용하고, 가속도 스펙트럼에 적합하도록 발생시킨다. 모의지진동의 위상특성이 응답에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 모의 지진동의 위상특성으로 3개의 기록지진동 즉, El Centro 1940(NS성분), Taft 1952(EW성분) 및 1995년 일본 효고현 남부 지진의 고오베 해양기상대(NS성분)의 기록 지진동을 채용한다. 또 3개 기록지진동의 위상특성을 이용하여 작성한 모의 지진동의 손상한계 레벨에서의 최대가속도파는 각각 110cm/s^2 , 126cm/s^2 , 129cm/s^2 이다.

<그림 3>에 작성한 모의 지진동과 목표스펙트럼을 비교하여 표시하였다. 이 그림으로부터 모의 지진동이 목표 스펙트럼(감쇠정수 $h=5\%$)에 적합함을 알 수 있다. 또 작성한 모의 지진동에 대하여 감쇠정수에 따른 응답스펙트럼의 변화도 <그림 3>에 함께 표시하였다.



<그림 3> 목표스펙트럼과 모의지진동의 응답스펙트럼 비교 (손상한계, 제2종 지반, $h=2\%, 5\%, 10\%$)

3. 응답해석의 기초이론과 응답성상의 분석방법

3.1 운동방정식

구조물 전체의 선형진동 방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M][\xi]\{\ddot{u}_g\} \quad (5)$$

여기서 구조물의 자유도를 n 으로 한다. $[M]$, $[C]$ 및 $[K]$ 는 각각 $(n \times n)$ 의 질량, 감쇠 행렬 및 강성 행렬을 표시한다. $[\xi]$ 는 $(n \times 3)$ 의 지진영향 행렬, $\{\ddot{u}_g\}$ 는 3차의 지동 가속도 벡터이다.

$$[\xi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} = [\{\xi_x\} \{\xi_y\} \{\xi_z\}] \quad (6)$$

$$\{\ddot{u}_g\} = \{\ddot{u}_{gx} \quad \ddot{u}_{gy} \quad \ddot{u}_{gz}\}^T \quad (7)$$

고유진동모드 $\{s u\}$ 를 이용하여 변위 벡터 $\{x\}$ 를 분해 하면 식(8)과 같이 된다.

$$\{x\} = \sum_{s=1}^m \{s u\} \cdot {}_s \phi(t) \quad (8)$$

감쇠행렬 $[C]$ 가 비례형 감쇠라고 가정하고 모드의 직교성을 고려하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$${}_s \ddot{\phi}(t) + 2 {}_s h {}_s \omega {}_s \dot{\phi}(t) + {}_s \omega^2 {}_s \phi(t) = - {}_s \beta \ddot{u}_{gx} - {}_s \beta \ddot{u}_{gy} - {}_s \beta_z \ddot{u}_{gz} \quad (9)$$

여기서 ${}_s \omega$, sh 는 각각 s 차 모드의 고유 원진동수와 감쇠정수를 나타내며, ${}_s \beta_x$, ${}_s \beta_y$, ${}_s \beta_z$ 는 각각 X , Y , Z 방향의 s 차의 참여계수로 다음 식으로 정의 된다.

$${}_s \omega^2 = \frac{\{s u\}^T [K] \{s u\}}{\{s u\}^T [M] \{s u\}}, \quad (10)$$

$${}_s h = \frac{1}{2 {}_s \omega} \frac{\{s u\}^T [C] \{s u\}}{\{s u\}^T [M] \{s u\}} \quad (11)$$

$${}_s \beta_k = \frac{\{s u\}^T [M] \{\xi_k\}}{\{s u\}^T [M] \{s u\}} \quad k = X, Y, Z \quad (12)$$

3.2 유효 질량과 유효 질량비

X 방향 입력지진동만 작용한 경우($\ddot{u}_{gX} \neq 0$, $\ddot{u}_{gY} = 0$, $\ddot{u}_{gZ} = 0$)를 가정하자. X 방향의 지진동 \ddot{u}_{gX} 에 대한 s 차 모드의 절대 가속도의 최대 분포 $\{s \ddot{y}_{max}\}$ 는 다음 식으로 된다.

$$\{s \ddot{y}_{max}\} = {}_s \beta_x \cdot {}_s S_{AX} \cdot \{s u\} \quad (13)$$

여기서 ${}_s S_{AX}$ 는 지진동 \ddot{u}_g 의 절대가속도 응답 스펙트럼이다. X 방향 지진동에 대한 s 차 모드의 전단력 계수 ${}_s Q_{BX}$ 는 X 방향으로 작용하는 지진력의 합과 같으므로 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$${}_s Q_{BX} = \{\xi_x\}^T [M] \{s \ddot{y}_{max}\} \equiv {}_s M_X \cdot {}_s S_{AX} \quad (14)$$

여기서 ${}_s M_X$ 는 X 방향의 s 차의 유효질량으로 다음 식으로 정의된다.

$${}_s M_X = {}_s \beta_x \cdot \{\xi_x\}^T [M] \{s u\} = {}_s \beta_x^2 \cdot M_{TX} \\ M_{TX} = \{\xi_x\}^T [M] \{\xi_x\} \quad (15)$$

여기서 전개정리의 공식¹⁰⁾을 고려하면 유효 질량의 합은 X 방향의 전 질량의 합 M_{TX} 와 같아진다⁹⁾. 따라서 유효질량 ${}_s M_X$ 를 M_{TX} 로 나눈 값을 유효 질량비 ${}_s \rho_X$ 라고 하면 다음 식이 성립한다.

$$\sum_{s=1}^m {}_s \rho_X = 1, \quad {}_s \rho_X = \frac{{}_s M_X}{M_{TX}} \quad (16)$$

본 절에서는 X 방향에 관해서만 설명했으나 Y , Z 방향의 유효 질량, 유효질량 비도 같은 방법으로 정의할 수 있다.

3.3 각 모드의 최대 변형도 에너지

선형범위에서 구조물의 변형도 에너지 E는 다음 식으로 정의한다.

$$E = \frac{1}{2} \{x\}^T [K] \{x\} \quad (17)$$

이 식에 (8)식을 대입하면 각 모드의 변형도 에너지 E로 분리할 수 있다.

$$E = \sum_{s=1}^m {}_s E, \quad {}_s E = \frac{1}{2} \{ {}_s u \}^T [K] \{ {}_s u \} {}_s \phi(t)^2 \quad (18)$$

또 X방향으로만 지진동이 입력된다고 생각하면 s차의 변형도 에너지의 최대치 ${}_s E_X$ 는 다음 식으로 된다.

$${}_s E_X = \frac{1}{2} \{ {}_s u \}^T [K] \{ {}_s u \} = \frac{1}{2} {}_s \rho_X \cdot M_{TX} \cdot {}_s S_{vX}^2 \quad (19)$$

따라서 s차 모드의 최대 변형도 에너지(또는 운동 에너지) ${}_s E_X$ 는 유효질량과 속도응답 스펙트럼 ${}_s S_{vX}$ 를 이용하여 구할 수 있다.

4. 고유진동해석

4.1 해석방법

막면의 면의 방향 강성은 초기장력에 의한 기하강성의 영향이 크므로 고정하중 및 장력을 도입한 상태에서 고유진동해석을 수행한다. 구체적으로 초기 장력에 의한 기하강성을 고려한 접선강성 행렬을 작성하여 이 접선강성 행렬과 질량행렬로부터 고유진동해석을 수행한다.

4.2 감쇠행렬의 가정

본 연구에서 대상으로 하는 구조물에서는 X방향 및 Y방향 입력 지진동에 대해 발생하는 주요 모드(1차와 2차 모드)의 고유주기는 대략 0.5sec에서 0.6sec 정도 된다. 탄성범위에서의 감쇠행렬(초기 감쇠행렬)은 주요 모드의 감쇠정수가 대략 2% 정도로

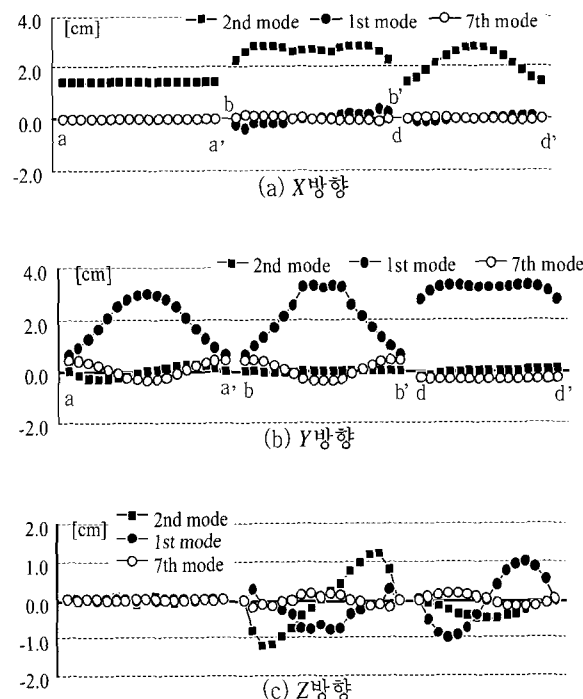
되도록 주기 0.7sec와 0.2sec에 대해 감쇠정수가 2%인 Rayleigh 감쇠로 가정한다.

4.3 고유진동수와 고유모드 형상

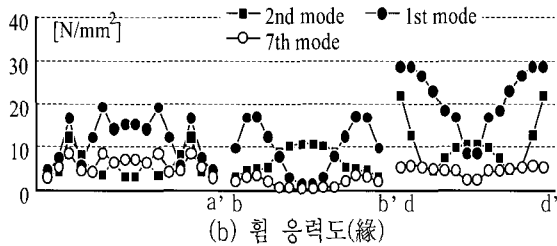
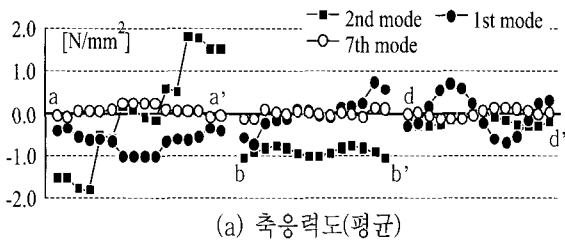
하부구조에 부착된 가새의 항복 충전단력 계수 $\alpha_{By}=0.3$ 의 모델을 대상으로 하여 고유진동해석 결과를 분석한다. 각 모드의 고유주기 T, 감쇠정수 h 및 유효 질량비 ρ 를 <표 4>에 표시하였다. 또 각 모드가 구조물의 변형과 응력에 미치는 영향을 분석하기 위해 손상한계에 상응하는 지진력이 작용하는 경우의 각 모드의 최대 변형도 에너지도 표시하였다. 또 최대 변형도 에너지는 (19)식으로 구한다. 또한 (13)식 으로부터 손상한계시의 각 모드의 최대

<표 4> 각 모드의 고유주기, 감쇠정수, 유효질량비, 변형도 에너지(손상한계, $\alpha_{By}=0.3$)

차수	T (sec)	h (%)	유효질량비 ρ		변형도에너지 E (N m)	
			X방향	Y방향	X방향	Y방향
1	0.541	1.78	0.000	0.724	0	1902
2	0.506	1.74	0.897	0.000	2054	0
5	0.340	1.67	0.000	0.000	0	0
7	0.313	1.69	0.000	0.263	0	230



<그림 4> 각 모드의 최대변위 분포



<그림 5> 각 모드의 응력도(손상한계, $\alpha_{By}=0.3$)

변위 분포를 구한다. 연보(a-a'), 중앙(b-b') 및 아치 보(d-d')의 각 모드의 최대변위 분포를 <그림 4>에 표시 하였다. 또 각 모드의 최대변위에 대응하는 연보 (a-a', c-c') 및 아치 보(d-d')의 축 응력도, 휨 응력도를 <그림 5>에 표시하였다.

X방향지진동이 작용하는 경우, X방향의 유효 질량이 큰 2차 모드 (고유주기 0.51sec, 유효 질량비 $\rho=0.897$)가 크게 발현할 것으로 예상된다. 2차 모드의 유효 질량비는 그 외의 모드의 유효 질량비에 비해 크므로 2차 모드만이 크게 발현되는 1모드 지배형의 응답성상을 나타낼 것으로 예상된다. 2차 모드는 하부구조 주두의 수평변위가 크게 나타나고 중앙부(b-b')의 연직방향 변위분포는 역대칭 분포가 된다. 2차 모드의 아치 보의 최대연직 변위는 주두의 최대수평변위와 같은 정도이다. 따라서 수평 지진동에 의한 연직방향의 지진하중을 고려할 필요가 있을 것으로 예상된다.

Y방향 지진동이 작용할 경우, 1차 모드 (고유 주기 0.54s)의 유효질량비가 가장 크고, 7차 모드 (고유주기: 0.31s)의 유효질량비가 그 다음으로 크다. Y 방향 입력에 대해서는 1차와 7차 모드가 동시에 진동하는 2모드 지배형 응답성상을 보일 것으로 예상된다. 1차 모드는 하부구조 주두의 수평 변위가 크게 발현되고, 아치 보상의 절점(d-d')의 연직변위 분포는 역대칭 분포로 된다. 1차 모드는 장변 방향 연보(a-a')의 중앙점A가 특히 큰 처짐 변형 모드가 된다. 이것은 단변면에 가새가 배치되어 있으므로 Y

방향의 수평강성은 단변면에 비해 중앙 부가 상대적으로 작게 되기 때문이다. 또, 아치 보의 축 응력도와 휨 응력도는 1차 모드가 가장 크다.

5. 수평지진동에 대한 탄소성 지진응답의 분석

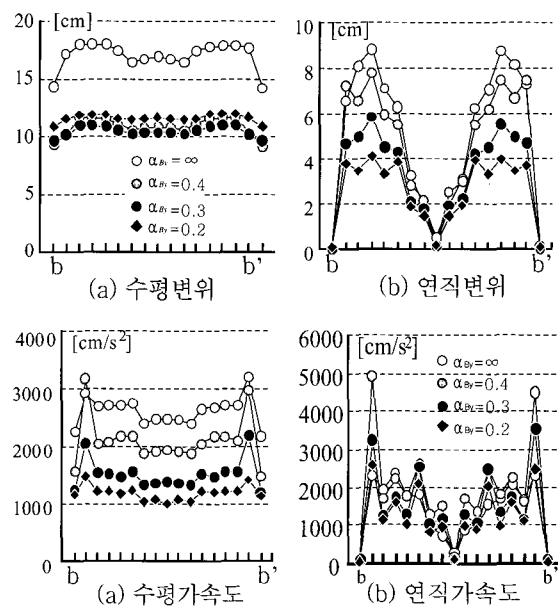
5.1 해석방법 및 해석조건

지진응답해석에서는 Newmark- β 법($\Delta t=0.002\text{sec}$, $\beta=0.25$)을 사용한다. 구조물에 작용시킨 고정 하중은 준정적 해석($\Delta t=0.002\text{sec}$, $\beta=0.25$, 감쇠정수 $h=100\%$)을 수행하여 구조물에 작용시킨다.

본 절에서는 하부구조 가새의 항복 층 전단력 계수 $\alpha_{By}=0.3$ 의 모델에 대해서 X방향 또는 Y방향으로 안전한계 레벨의 지진동이 작용한 경우의 지진 응답성상을 주로 분석한다. 또 본 절에서는 El Centro 1940 (NS 성분)의 위상의 모의 지진동을 시각이력 입력 지진동으로 한다.

5.2 변위 및 절대 가속도(X방향입력)

X방향으로 안전한계에 상당하는 (지진동의 세기 $\lambda=5.0$) 지진동이 작용하는 경우, 중앙부(b-b')의 변위 및 절대 가속도의 절대치 분포를 <그림 6>에 표



<그림 6> 최대변위 및 최대 절대가속도의 절대치 분포 (X방향 입력, 안전한계)

시 하였다.

이 그림에서 고정하중시의 변형은 빠져있다. 여기서 α_{By} 는 하부구조 가새의 항복 충전단력 계수를 표시 하며 α_{By} 는 탄성 가새를 표시한다.

하부구조 가새가 탄성($\alpha_{By}=\infty$)인 경우, 하부구조 주두에서의 수평변위는 15cm정도가 된다. 한편, 하부 구조 가새가 소성화되는 경우($\alpha_{By}=0.3$ 인 경우, 하부 구조 주두에서의 최대변위가 9.7cm(층간변형 각으로 약 1/80정도)로 큰 값이 된다. 하부구조가 탄성체인 경우에 비해 하부구조가 Bi-Liner형 가새로 구성된 모델($\alpha_{By}=0.2\sim 0.4$)의 주두에서의 수평변위는 작게 된다. 일반적으로는 하부구조의 소성화에 동반하여 하부구조의 수평변위는 커질 것으로 생각되나 이력흡수 에너지 성능이 높은 가새를 하부 구조에 도입한 경우, 하부구조의 수평변형도 억제 하는 결과가 된다. 또, 하부구조에 도입하는 가새의 이력 이상부구조에 미치는 영향, 지진동의 위상특성이 미치는 영향에 관해서는 향후에 검토할 필요가 있다.

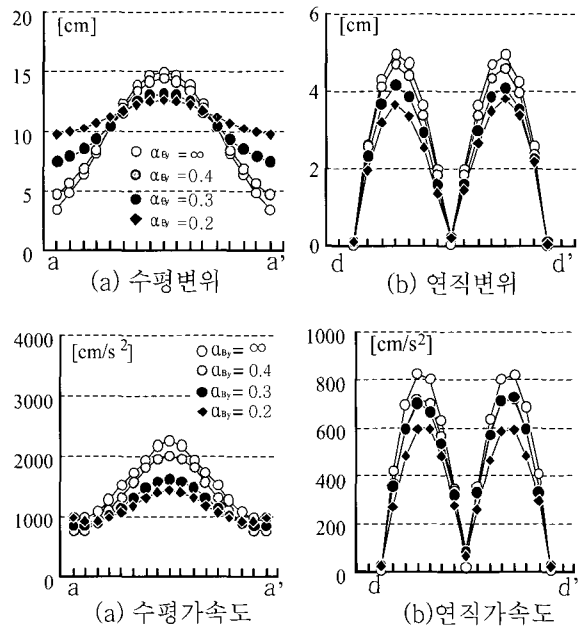
하부구조의 가새가 탄성($\alpha_{By}=\infty$)인 경우 상부구조 중앙(b-b')의 연직방향 분포는 역대칭의 변위분포가 발생하고 최대6.0cm정도가 된다. $\alpha_{By}=0.3$ 의 가새를 가지는 경우, 연직변위의 최대값은 6cm정도로 저감된다. 또 중간층 면진 동과 하부구조 항복형동의 기왕의 연구와 마찬가지로 α_{By} 가 작을수록 연직 변위의 최대치가 저감되는 경향이 있다.

하부구조 가새가 탄성($\alpha_{By}=\infty$)인 경우 수평방향의 최대가속도는 대략2,000cm/s²로 일정한 값을 나타낸다. $\alpha_{By}=0.3$ 인 가새를 가지는 경우 수평방향의 최대 가속도의 최대값은 1,500cm/s²로 저감된다.

하부구조의 가새가 탄성인 경우, 연직방향의 절대 가속도의 최대치는 2,000cm/s²~2,500cm/s²로 된다. 하부구조의 가새가 $\alpha_{By}=0.3$ 인 경우 연직방향 절대 가속도는 보 및 누름 케이블상의 절점에서는 2,500 cm/s² 정도로 되는 것에 반해 막면상의 절점에서는 3,500cm/s²로 아주 큰 값이 된다. 하부구조 가새의 소성화에 동반하여 막면의 연직방향 가속도는 증가 하는 경향이 있다.

5.3 변위 및 절대가속도(Y방향입력)

Y방향으로 안전한계에 상당하는(지진동의 세기 λ



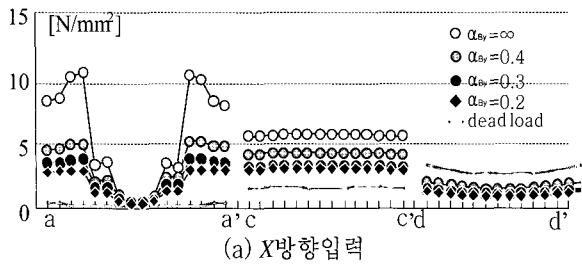
<그림 7> 최대변위 및 최대 절대가속도의 절대치 분포 (Y방향 입력, 안전한계)

=5.0)지진동이 입력한 경우의 응답성상의 분석을 수행한다. 장변 방향의 연보(a-a')의 수평변위 및 가속도 성분, 중앙부(b-b')의 연직변위 및 절대 가속도의 절대치 분포를 <그림 7>에 표시한다. 또한 고정 하중시의 변형은 빠져 있다. 여기서 α_{By} 는 하부 구조 가새의 항복 충전단력 계수를 표시하며 α_{By} 는 탄성 가새를 나타낸다.

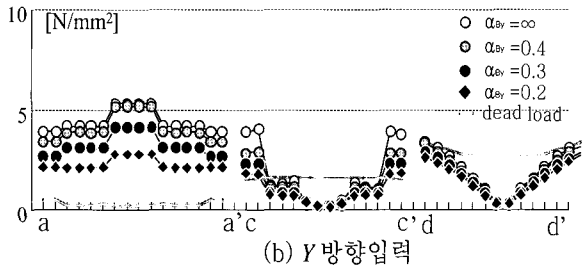
하부구조의 단변면의 가새가 탄성($\alpha_{By}=\infty$)인 경우 단변면의 수평변위는 4cm정도로 장변면 중앙부의 점A는 15cm정도가 된다. 이것은 단변면의 수평 강성이 높기 때문에 장변 방향의 연보(a-a')의 중앙점 A의 수평변형이 크게 되기 때문이다. 큰 지진동에 대해서는 단변면의 가새가 항복한다. 단변면의 가새가 bi-linear형 이력인 경우, 단변면 가새의 α_{By} 가 작을수록 조기에 가새가 항복하고 에너지를 흡수하기 때문에 상부구조의 연직방향 가속도와 변위는 저감되는 경향이 있다. 아치 보의 최대 가속도는 수평방향에서 800cm/s²정도, 수직 방향에서 700cm/s²로 된다.

5.4 최대축응력도(평균)와 최대 휨 응력도(緣)의 분포

안전한계 레벨의 입력지진동에 대한 장변 방향의 연보 (a-a'), 단변면의 연보(c-c')및 아치 보(d-d')

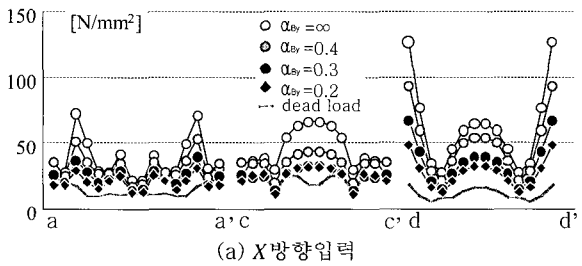


(a) X방향입력

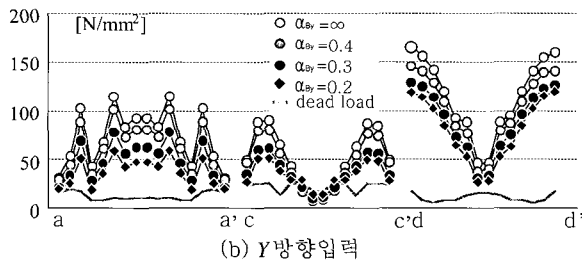


(b) Y방향입력

<그림 8> 휨 응력도(緣)의 최대치 분포(안전한계)



(a) X방향입력



(b) Y방향입력

<그림 9> 휨 응력도(緣)의 최대치 분포(안전한계)

의 축 응력도(평균)를 <그림 8>에 표시하고, 휨 응력도를 <그림 9>에 표시하였다. 단, 고정 하중시의 응력도는 제외하였다.

또 비교를 위해 고정하중시의 응력도 분포도 함께 표시하였다. 안전한계에서는 하부구조는 소성화되고 있으며 단변 가새가 bi-linear형 이력인 경우 단변면 가새의 α_{By} 가 작을수록, 초기에 가새가 항복하여 에너지를 흡수한다. 이 때문에 상부 아치의 축 응력도와 휨 응력도는 α_{By} 가 작을수록 감소하는 경향이 있다.

X방향입력에서는 2차 모드의 영향, Y방향 입력

에서는 1차 모드의 영향이 각각 크다는 것을 알 수 있다. 축 응력도는 휨 응력도에 비해 작은 값을 보이고 있다.

아치 보의 휨 응력도는 Y방향 입력 쪽이 X방향 입력보다 크게 되고 있음을 확인할 수 있다.

5.5 막과 누름 케이블의 응답

안전한계 레벨의 입력 지진동에 대한 누름 케이블과 치환 케이블재의 최대응답 변형도를 <표 5>에 정리하였다. 또 최대응답 변형도에 상당하는 막장력도 이 표에 표시하였다. 응답 변형도로부터 응답장력을 계산하면 누름 케이블에서는 장력이 초기장력의 10~15% 정도, 막에서는 0.7kN/m, 즉 초기장력 2kN/m의 35%정도 증가하였다. 참고문헌 2)에서도 이미 지적하였듯이 수평지진동에 의해 막의 진동이 탁월 하려고 하는 모드가 발생할 가능성이 작고 막 자신의 진동에 의해 발생할 응답 변형도와 장력은 미소하다.

그러나 하부 가새의 소성화에 동반하여 치환 케이블재의 응답 변형도와 최대 막장력은 감소하고 있어 막면에서의 최대가속도의 증가에 기여하는 영향은 작다. 또 Y방향의 입력에 대해서도 하부구조의 항복에 동반하여 상부구조의 응답이 저감하는 경향을 확인할 수 있다.

<표 5> 누름 케이블 및 치환 케이블의 최대응답 변형도와 최대응력 (안전한계)

입력	위치	최대변형도 ($\times 10^6$)	상당응력
X방향 ($\alpha_{By}=0.3$) (탄소성)	누름케이블	36	2.19 kN
	X방향	303	0.36 kN/m
	Y방향	475	0.46 kN/m
Y방향 ($\alpha_{By}=0.3$) (탄소성)	누름케이블	40	2.48 kN
	X방향	239	0.28 kN/m
	Y방향	703	0.68 kN/m
X방향 ($\alpha_{By}=\infty$) (탄성)	누름케이블	64	3.95 kN
	X방향	312	0.37 kN/m
	Y방향	715	0.69 kN/m
Y방향 ($\alpha_{By}=\infty$) (탄성)	누름케이블	46	2.80 kN
	X방향	331	0.39 kN/m
	Y방향	1091	1.05 kN/m

6. 결 론

본 연구에서는 골조막 구조의 일례로서 사각형 지붕의 체육관을 설정하여 안전한계에 상당하는 지진동이 작용하는 경우의 지진응답 성상을 분석하였다. 그 결과 얻어진 결론을 다음과 같이 정리한다.

- 1) 하부구조를 구성하는 가새의 항복 층전단력 계수를 변수로 한 해석을 수행하고 하부구조가 소성 화합에 따라 상부구조 가구의 응력도 및 연직 변위가 저감한다.
- 2) 막면의 연직가속도는 증가하는 경향이 있고 막의 최대응답 변형도와 상당하는 응력은 감소하는 경향이 있다.

구조물의 진동성상을 보다 정확하게 반영하면서 정적 해석으로부터 응답을 추정하기 위해서는 참고 문헌 8)에 표시한 것과 같은 고차 모드의 영향을 고려한 한계내력설계의 적용에 관한 연구를 수행할 필요가 있다. 또, 하부구조의 이력특성이 다른 경우에는 별도의 분석이 필요하다.

참고문헌

1. M. Midorikawa : Performance-Based Seismic Design Provisions for Buildings in Japan, Proc. of IASS Symposium 2005, Bucharest, pp307-316.
2. 石井一夫, 加藤史郎, 大森博司, 小田憲史, 藤本益美 · 元結正次郎, 大崎純, 中澤祥二, 小西克尚 : 骨組膜構造物の耐震性能評価のための地震応答解析, 膜構造研究論文集 2002, No.16, pp.1-12, 2001년12월.
3. 中澤祥二, 加藤史郎, 吉野達矢, 小田憲史 : 骨組膜構造の限界耐力計算に関する基礎的研究, 膜構造研究論文集, No.18, pp1-14, 2004년 12월.
4. M.C. Cheong, S. Kato, S.E. Han and J.W. Kim :

Pushover Analysis of a Double Layer Latticed Dome, Proc. of IASS Symposium 2001, Nagoya. TP081.

5. 加藤史郎, 中澤祥二 : 下部構造エネルギー吸収型単層ラチスドームの地震時動的崩壊性状, 日本建築学会構造系論文集, 第548号, pp81-88, 2001년10월.
6. Shiro Kato, Shoji Nakazawa : Seismic Design Method to Reduce the Responses of Single Layer Reticular Domes by Means of Yielding of Substructure Under Severe Earthquake Motions, Proc. of IASS Symposium 2001, Nagoya, pp178-179.
7. 加藤史郎, 小西克尚 : ラチスドームのPush-over analysisに基づく地震応答推定に関する一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp.153-160, 2002년11월.
8. 小西克尚, 加藤史郎, 中澤祥二, 倉本洋 : ラチスドームのPush-over analysisに基づく地震応答推定に関する一考察, 2つのモードが支配的な空間構造物に対する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第569号, pp.89-96, 2003년7월.
9. 加藤史郎, 小西克尚, 中澤祥二, 向山洋一, 打越瑞昌 : 下部構造に支持された空間構造の振動解析用質点簡易モデル : 構造工学論文集, Vol.48B, pp.37-47, 2002년3월.
10. 柴田明德 : 最新耐震解析, 森北出版, 1981년.
11. 日本鋼構造協会編, 吊構造, コロナ社, 1975년.

(注 1) 본 논문은 참고문헌³⁾에서 검토하지 못했던 하부구조의 항복 층전단력 계수 α_{By} 의 영향을 분석 하기 위해 수행하였던 내용을 정리한 것이다.

(注 2) 해석은 일본측에서 수행하였고, 본 논문은 中澤와 정 명채가 주도적으로 정리 하였다.