

一方向大スパン複層円筒トラス構造物の地震応答解析

EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF ONE-WAY LONG-SPAN DOUBLE-LAYER CYLINDRICAL TRUSS STRUCTURES

和田 章*, 向 秀元**
Akira WADA and Hidemoto MUKAI

Earthquake response of long-span space truss structure is generally analyzed by the use of equivalent continuum shell theory, because the enormous number of nodes and members of the structure makes the computation quantity very huge when it is treated as frame structure. Efforts have also been made to reduce the degrees of freedom by statical mass-condensation method. But it is certainly difficult to trace the behavior of the truss structure by shell theory when buckling behavior of members is taken into consideration.

By comparing the analytical results of a full degree-of-freedom model and a reduced degree-of-freedom model in this paper, it is concluded that a model with all degrees of freedom is necessary for elasto-plastic analysis of earthquake response.

In this paper, a full degree-of-freedom model is applied to 5 double-layer cylindrical truss structures, which have the same span length of 200 meters and differ from each other either in rise or in length perpendicularly to the span. Earthquake response analyses are carried out with consideration of the buckling behavior of the members.

It is found out that for cylindrical truss structures considered in this paper, close attention is required for horizontal movements which are perpendicular to the span. For statically indeterminate structures, even if a certain member buckles and fails to bear the load caused by self weight of the structure, the whole structure system will not collapse immediately. It is only when the buckling members increase to a certain number, the structure fails to support its own weight and collapses.

Keywords : *Earthquake Response Analysis, Long-span Truss Structure, Member Buckling Behavior*

§1. 序 論

近年、国内外を問わず、スパンが100~200 mの大スパン構造物に対する建設要求が高まってきている。我が国において、大スパン構造物の安全性を確保するためには、地震時における挙動を正しく把握する必要がある。

大スパン構造物の地震応答解析では、シェル構造物に関しては、屋根型偏平球殻シェルについて入力位相差が応答値に及ぼす影響について検討している加藤ら¹⁾の研究、上下地震動を受ける球殻の振動特性を明らかにしている加藤・横尾ら^{2),3)}の研究、片持コノイドおよび筒形シェル屋根の静的応答解析と動的応答解析の比較からシェル形状およびライズ、厚さのシェル屋根に対する地震動の影響について検討を行っている真下・田中ら⁴⁾の研究、裾梁付円錐形および球形シェルについて上下動ならびに水平動地震が作用した場合についての動的応答解析を行い支持条件およびライズの変化による動力学的特性を究明している西村ら^{5),6)}の研究、単純支持された

Parabolic Velaroidal Shell の位相差入力を考慮した場合の上下動応答解析を行い逆対称モードの励起が応答に及ぼす影響を考察している田中ら⁷⁾の研究等数多くの研究がなされているが、トラス構造物に関しては、節点数・部材数が膨大となるため連続体置換されシェル理論により解析が行われ^{1),5),7)}、骨組として解析されたものは少ない。しかし、シェル理論による解析では、全体座屈・部分座屈の扱いは可能であるが、個々の部材の座屈までを扱うことは不可能である。また、骨組として解析する際には、質点数を少なくする等自由度を少なくする工夫がなされている⁸⁾⁻¹⁰⁾が、部材の各節点に質量を設け全自由度を考慮した場合と質点を集約した場合とでは、必ずしも応答が一致するとは限らないと考える (Appendix 参照)。

大スパントラス構造物の地震応答解析に関する研究としては、大屋¹¹⁾は鉄骨立体骨組構造の地震応答解析を行い応答が地動の上下動に支配されることを報告してお

* 東京工業大学 教授・工博

** 東京工業大学 大学院生

Prof. of Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Graduate Student of Tokyo Institute of Technology

り、加藤ら^{9),10)}は梁の上弦材の構面外座屈による崩壊形式を有する平行弦トラス梁、直交交差型トラス平板が上下地震動を受けて動的崩壊する挙動を分析するとともにそのときの崩壊最大加速度の推定法を提案している。

以上の研究の数多くは、周辺に支持点を有する大スパントラス構造物では面内方向の剛性耐力が大きいため、上下地震動に対する構造物の応答特性を扱っているが、一方向のみに支持された構造物ではスパン方向と直角方向の水平地震動による影響が大きいと考えられる。

そこで、本論文では、大スパントラス構造物のうち複層円筒トラス構造物を例にとり、全部材の軸力—軸伸縮関係を独立に扱い各節点に質量を設け全自由度を考慮したモデルを用いて地震応答解析を行い、スパン方向の水平動および上下動に対するライズによる影響、桁行方向の水平動に対する桁行方向の長さによる影響を考察し、大スパン構造物の力学的挙動を把握する。

§2. 解析方法

2.1 解析上の仮定

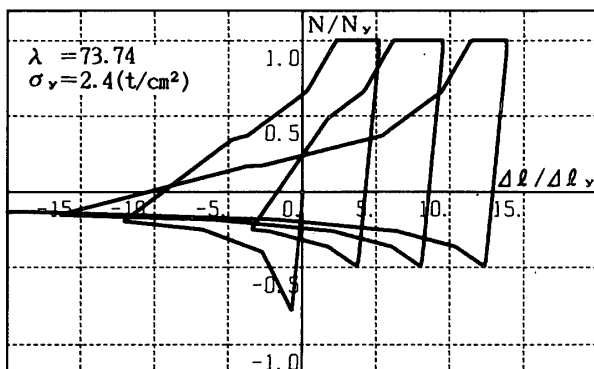
解析を行うに際し、以下の仮定を設ける。

- (1)部材はすべて線材として扱う。
- (2)部材の両端はピン接合とし、変形は軸方向変形のみを考慮する。
- (3)部材の軸力—軸伸縮関係には柴田らが提案した関数¹²⁾を適用する。ただし、柴田らが定式化した関数では、初期載荷時の圧縮耐力が小さく設定されているため、処女圧縮耐力に関しては材料の応力—ひずみ関係に基づき有限変位理論を用いて行った部材の弾塑性解析より求めた座屈曲線¹³⁾に合うように座屈耐力を高めた曲線を用いる(図—1)。
- (4)質量は節点集中質量とし、部材中間部分には慣性力は作用しないものとする。

2.2 地震応答解析法

微小時間 Δt 内で構造物の瞬間接線剛性 $[K(t)]$ が一定であるとすると、応答変位増分に関して(1)式の振動方程式が成り立つ。

$$[M]\{\dot{y}_{n+1}\} + [C]\{y_{n+1}\} + [K(t_n)]\{\Delta y_n\} + \{F_n\}$$



図—1 部材の軸力—軸伸縮関係

$$= -[M] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_{cxn+1} \\ \dot{y}_{cyn+1} \\ \dot{y}_{czn+1} \end{Bmatrix} + \{Q\} \dots (1)$$

ここで、

$[M]$: 節点質量マトリックス

$[C]$: 減衰マトリックス

$[K(t_n)]$: $t = t_n$ における瞬間接線剛性マトリックス

$\{y_n\}$: $t = t_n$ における節点変位ベクトル

$\{\Delta y_n\} = \{y_{n+1}\} - \{y_n\}$

$\{F_n\}$: $t = t_n$ における初期応力ベクトル

$\begin{Bmatrix} \dot{y}_{cxn+1} \\ \dot{y}_{cyn+1} \\ \dot{y}_{czn+1} \end{Bmatrix}$: $t = t_{n+1}$ における地動の全体座標系における X, Y, Z 方向の加速度ベクトル

$\{Q\}$: 自重による荷重ベクトル

ドットは時間 t についての微分を表す。

減衰マトリックスは、(2)式で示される剛性比例型とする。

$$[C] = 2h/w_1 [K_0] \dots (2)$$

ここで、

h : 減衰定数 ($h = 0.02$)

w_1 : 1次固有円振動数

$[K_0]$: 初期剛性マトリックス

瞬間接線剛性マトリックスは、(3)式で示される大変形の影響を考慮した理論による要素剛性マトリックスより求める¹⁴⁾。

$$\begin{Bmatrix} \Delta f_{ix} \\ \Delta f_{iy} \\ \Delta f_{iz} \\ \Delta f_{jx} \\ \Delta f_{jy} \\ \Delta f_{jz} \end{Bmatrix} = [K_e] \begin{Bmatrix} \Delta u_{ix} \\ \Delta u_{iy} \\ \Delta u_{iz} \\ \Delta u_{jx} \\ \Delta u_{jy} \\ \Delta u_{jz} \end{Bmatrix}$$

$$[K_e] = \begin{bmatrix} K & 0 & 0 & -K & 0 & 0 \\ 0 & N/L & 0 & 0 & -N/L & 0 \\ 0 & 0 & N/L & 0 & 0 & -N/L \\ -K & 0 & 0 & K & 0 & 0 \\ 0 & -N/L & 0 & 0 & N/L & 0 \\ 0 & 0 & -N/L & 0 & 0 & N/L \end{bmatrix} \dots (3)$$

ここで、

$\{\Delta f\}$: 節点の増分復元力ベクトル

$\{\Delta u\}$: 節点の増分変位ベクトル

$[K_e]$: 要素剛性マトリックス

K : 柴田らの履歴から求められる $t = t_n$ における部材の瞬間軸方向剛性

L : $t = t_n$ における節点間距離から求めた部材の長さ (節点間距離は最新の節点座標から

求める)

N: 柴田らの履歴から求められる $t=t_n$ における部材の軸力

添字 i, j は部材両端の節点番号, 添字 x, y, z は x が材軸方向, y, z が材軸と直交する2方向を表す。

自重は節点質量による重力を指す。

固有値解析においては, 剛性マトリックスに初期剛性マトリックスを使用した自由振動方程式より得られる(4)式を解いて, 固有周期および固有ベクトルを求める。

$$[[K_0]-w^2[M]]=0 \dots\dots\dots (4)$$

応答解析に当たっては, (1)式より線形加速度法により変位を求める。その際, 1ステップ内の誤差は(1)式の $\{F_n\}$ に含まれ, 次のステップで解消される。なお, その誤差については毎ステップ出力を行い, 誤差が小さいことを確認した。

§3. 解析に用いる複層円筒トラス構造物とその基本的性質

3.1 解析モデル

解析モデルは, 図-2に示す1グリッド約10×10m, スパン200m, 層厚4mの複層円筒トラス構造物であり, 図中 ab, cd間の下弦材の各節点をピン支持とした。解析パラメータとしては, 表-1に示すようにライズと桁行方向の長さを考慮した。そのうち, 解析に用いたタイプは5ケースであり, ライズによる影響については桁行長さ L を $B/2$ (B : スパン長) と一定とし中心半開角 ϕ が $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の3モデルの解析を行い, 桁行方向の長さによる影響については $\phi=30^\circ$ と一定とし $L=$

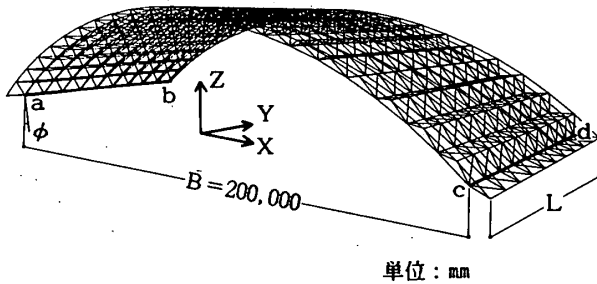


図-2 解析モデル

表-1 解析タイプ

L \ phi	上段:節点数 下段:部材数		
	15°	30°	45°
B/4		431 1600	
B/2	237 840	452 1680	882 3360
B		473 1760	

$B/4, B/2, B$ の3モデルの解析を行った。なお, 表中の数字は上段が節点数, 下段が部材数を表す。

解析に用いた材料定数を表-2に, 部材の断面性能を表-3に示す。部材は, スパン方向弦材, 桁行方向弦材, 斜材ごとに等断面とし, 細長比が70~85の間の値となるように決定した。

質量は, 節点間全長を部材が占めるものとし鋼の比重を7.86として求めた質量を両節間に振り分け, かつ上弦材の節点には, 仕上げ材等を考慮して最も低いライズの $\phi=15^\circ, L=B/2$ において下弦材の圧縮力がほぼ長期許容圧縮力¹⁵⁾になるように算出した質量を全モデルに対して付加した。その付加した質量の大きさは, 4隅の節点で0.35 ton, 辺上のそれ以外の節点で0.70 ton, その他の節点で1.40 tonである。

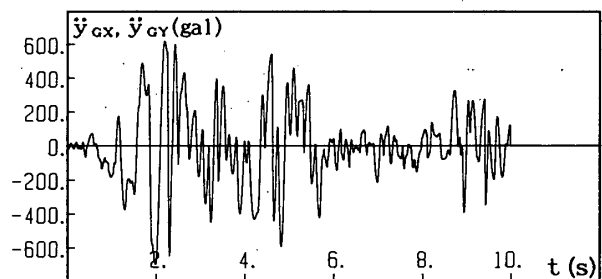
入力地震動には, 図-3に示す El Centeo (1940) を

表-2 材料定数

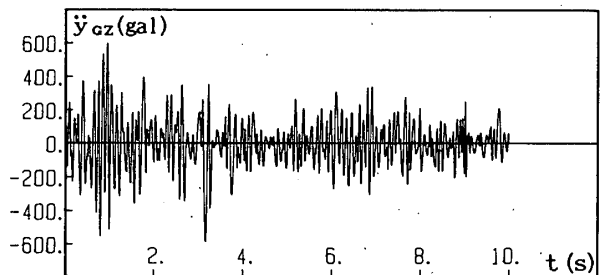
弾性剛性 (t/cm ²)	塑性剛性 (t/cm ²)	降伏応力度 (t/cm ²)
2100	21	2.4

表-3 部材の断面性能

部材種類	中心半開角	材長 (cm)	外径 (cm)	厚さ (cm)	断面積 (cm ²)	断面2次 半径(cm)	細長比			
上弦材	弦方向	15°	1011.5	40.64	231.2	13.7	73.74			
		30°	997.2				72.70			
		45°	1009.5				73.60			
	桁行方向	15°	1000.0				35.56	129.5	12.2	82.34
		30°								
		45°								
下弦材	弦方向	15°	1001.0	40.64	231.2	13.7	72.98			
		30°	977.3				71.25			
		45°	981.0				71.52			
	桁行方向	15°	1000.0				35.56	129.5	12.2	82.34
		30°								
		45°								
斜材	15°	814.3	31.85	0.7	68.5	11.0	73.93			
	30°	808.5					73.41			
	45°	811.0					73.63			



(a) Elcentro NS



(b) Elcentro UD

図-3 入力地震波

水平方向にはNS成分、鉛直方向にはUD成分を10秒間入力し、その後2秒間自由振動させた。入力地震動の最大加速度は、NS成分の最大加速度が700galとなるようにし、同じ比率でUD成分も増幅した。その最大加速度は597galである。地震動の記録間隔は0.01秒であり、その間は直線補間した。応答計算の時間刻み Δt は固有値解析の結果を参考に、解が発散しないよう十分小さくし、最小の固有周期の約1/7の $\Delta t=0.001$ 秒とした。

3.2 固有値解析結果

固有値解析による固有周期およびモードの形状を表一4に示す。また、表中の $\phi=30^\circ$ 、 $L=B/2$ について、固有モードを図一4に示す。これより、スパン方向の水平動に対しては1次モードのような形状、桁行方向の水平動に対しては3次モードのような形状、上下動に対して

は4次モードのような形状になることが考えられる。

§4. 複層円筒トラス構造物の応答性状

4.1 スパン方向の水平動および上下動を受けたときの動的挙動に対するライズの影響

$L=B/2$ の中心半開角の異なる $\phi=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の3ケースについてスパン方向の水平動および上下動に対する地震応答解析を行った結果、部材はすべて弾性範囲内であった。

表一5に全節点中での最大応答変位を絶対値で示す。(a)が水平動入力時、(b)が上下動入力時の最大応答変位である。水平動入力においては、スパン方向の最大

表一5 最大応答変位(初期の自重による変位を含む、()内の数字は初期の自重による変位を表す)

(a) スパン方向水平動入力時 (単位:cm)

中心半開角	スパン方向変位	桁行方向変位	鉛直変位
15°	5.98(1.18)	0.19(0.08)	31.49(14.90)
30°	11.78(0.19)	0.16(0.04)	27.92(5.05)
45°	16.03(0.65)	0.17(0.02)	22.29(2.82)

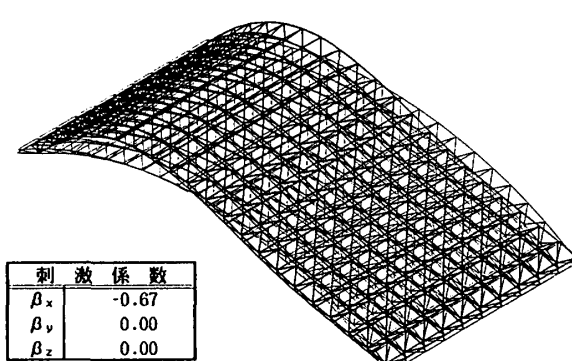
(b) 上下動入力時 (単位:cm)

中心半開角	スパン方向変位	桁行方向変位	鉛直変位
15°	1.55(1.20)	0.17(0.10)	29.06(19.49)
30°	1.27(0.55)	0.08(0.05)	11.57(8.13)
45°	2.22(1.36)	0.06(0.04)	8.74(6.42)

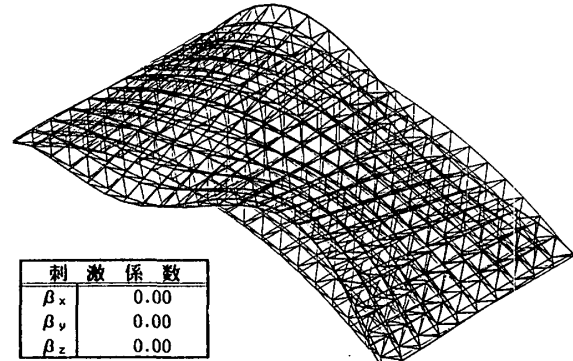
表一4 固有周期およびモードの形状

中心半開角	桁行長さ	上段:固有周期 (s)		下段:モードの形状 ^{#1}				
		1次	2次	3次	4次	5次		
15°	B/2	0.95	0.79	0.79	0.77	0.49		
		逆・対	対・逆	対・対	逆・逆	対・逆		
30°	B/4	1.06	0.84	0.58	0.58	0.42		
		逆・対	対・逆	対・対	逆・逆	対・逆		
	B/2	1.07	0.70	0.67	0.59	0.45		
		逆・対	逆・逆	対・逆	対・対	対・逆		
B	1.08	0.89	0.62	0.61	0.59			
	逆・対	逆・逆	逆・対	対・逆	対・対			
45°	B/2	1.29	0.75	0.65	0.61	0.45		
		逆・対	対・逆	逆・逆	対・対	対・逆		

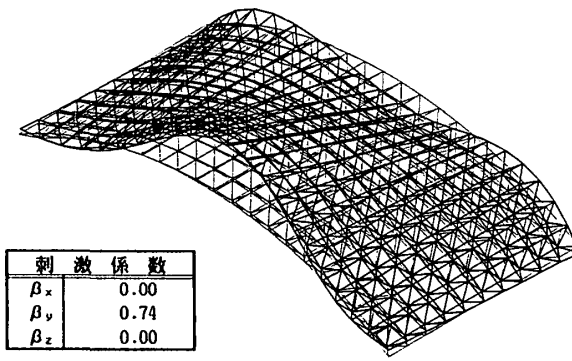
#1 対は対称モード、逆は逆対称モードを表す。また、左がスパン方向、右が桁行方向のモードの形状を表す。



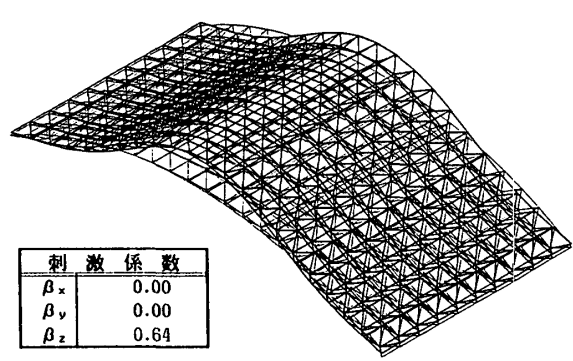
1次モード



2次モード



3次モード



4次モード

図一4 固有モード ($\phi=30^\circ, L=B/2$)

変位はライズが大きいほど大きくなるが、鉛直方向の最大変位はライズが小さいほど大きくなっている。また、水平動を与えたにもかかわらず鉛直変位の応答の方が大きい。上下動入力においても、鉛直方向の変位はライズが小さいほど大きくなっており、水平動入力に比べ差が顕著であり、 $\phi=15^\circ$ の結果は $\phi=45^\circ$ の約3.3倍となっている。水平動入力、上下動入力いずれの場合も鉛直変位を除いて入力方向以外の方向の変位はほとんど生じていない。

図-5に $\phi=30^\circ$ について鉛直変位が最大となった時の変形状態を示す。(a)が水平動入力時、(b)が上下動入力時の変形状態であり、変形を50倍に誇張してある。図中、細線が変形前、太線が変形状態を表す。水平動入力においてはスパン方向に逆対称、桁行方向に对称の変形状態となり、上下動入力においてはスパン方向、桁行方向ともに対称の変形状態となっている。したがって、鉛直変位は桁行方向中央で最大となっており、その断面内で、水平動入力では中央より $B/6 \sim B/4$ 離れた点で最大となり、上下動入力では中央で最大となっている。

表-6に各構成部材中での最大応答軸力を示す。(a)が水平動入力時、(b)が上下動入力時の最大応答軸力である。水平動入力、上下動入力いずれにおいても桁行

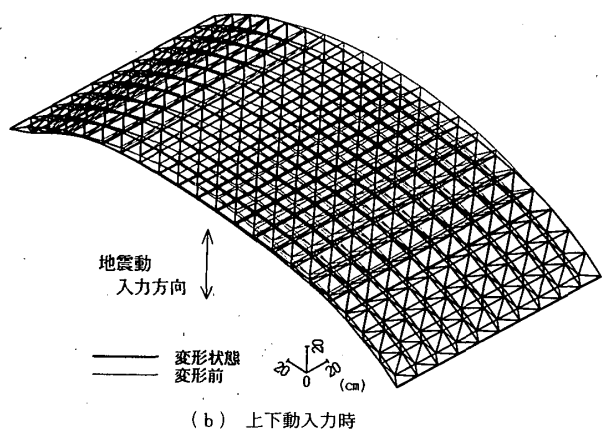
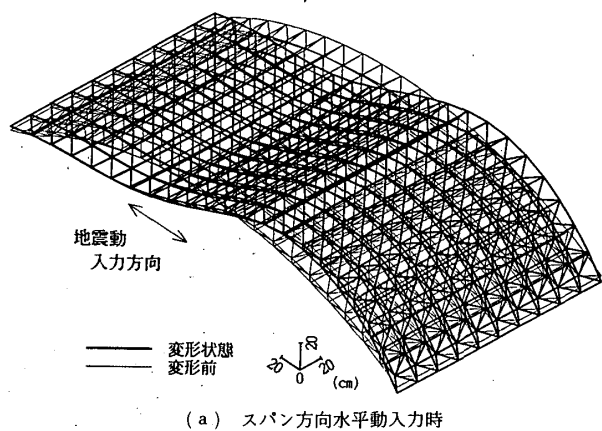


図-5 鉛直変位が最大時の変形状態 ($\phi=30^\circ$)
[変形倍率: 50倍]

方向の弦材にはほとんど軸力が生じず、スパン方向の弦材に大きな圧縮力が生じ、ライズが小さいほど大きな圧縮力を生じている。その軸力は、下弦材においては支持点近傍で大きくなっており、上弦材においては水平動入力時でスパン中央より $B/6 \sim B/4$ 離れた点で、上下動入力時ではスパン中央が大きくなっている。また、水平

表-6 最大応答軸力 (初期の自重による軸力を含む)

(a) スパン方向水平動入力時 (単位: ton)

中心半開角	上弦材		下弦材		斜材
	スパン方向	桁行方向	スパン方向	桁行方向	
15°	-345	-9.5	-367	-3.1	-65.4
	55	6.3	107	14.3	60.9
30°	-313	-10.5	-310	-5.7	-51.6
	152	8.7	187	10.8	47.9
45°	-222	-9.7	-284	-5.5	-37.3
	147	10.7	145	7.1	34.2

(b) 上下動入力時 (単位: ton)

中心半開角	上弦材		下弦材		斜材
	スパン方向	桁行方向	スパン方向	桁行方向	
15°	-311	-8.9	-358	-0.1	-39.6
	8	6.0	1	12.7	32.8
30°	-159	-5.6	-222	-0.9	-25.5
	16	5.7	24	5.4	19.4
45°	-120	-3.9	-190	-1.4	-16.6
	37	5.4	44	3.9	14.6

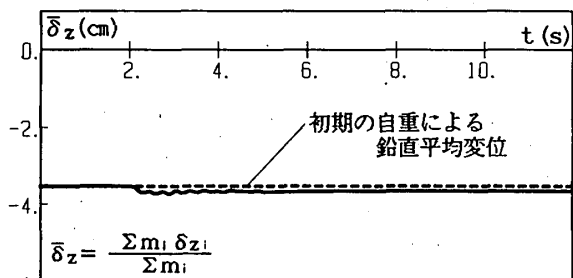
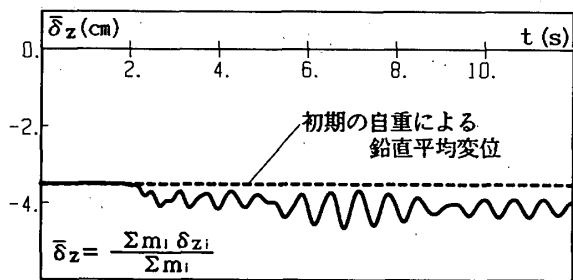
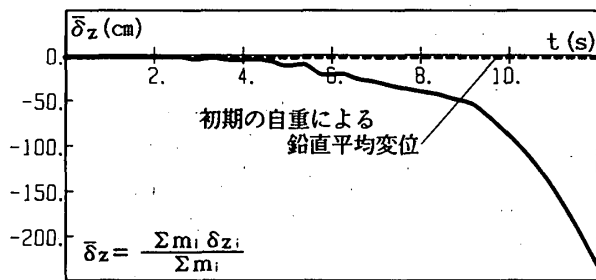


図-6 垂直平均変位の時刻歴

動入力時と上下動入力時を比較すると、いずれのライズにおいても水平動入力時に大きな軸力を生じている。

4.2 桁行方向の水平動を受けたときの動的挙動に対する桁行方向の長さの影響

桁行方向の長さの異なる $L=B/4$, $B/2$, B の3ケースについて桁行方向の水平動に対する地震応答解析を行った。ライズは中間の高さの $\phi=30^\circ$ のみを扱った。

図-6に鉛直平均変位の時刻歴を示す。(a)が $L=B/4$, (b)が $L=B/2$, (c)が $L=B$ の鉛直平均変位の時刻歴である。ここで、鉛直平均変位は各質点の鉛直変位に質量を乗じた値の総和を全質量で除した値を指す。また、図中の点線は初期の自重による鉛直平均変位を表す。 $L=B/4$ では、2.24秒から5.80秒までの間に支持点に近い下弦材が12本座屈し、それ以降変位が増大して行き9.00秒付近でスパン中央の上弦材も座屈したため、構造物が自重を支えきれなくなり崩壊へと至っている。その崩壊過程を図-7に示す。 $L=B/2$ では2.16秒から2.52秒までの間に支持点に近い下弦材12本、スパン中央の上弦材2本、 $L=B$ では2.12秒から2.48秒までの間に支持点に近い下弦材6本、スパン中央の上弦材2本、支持点に近い斜材36本が座屈し、変位が増大し始めているが、崩壊には至っていない。しかし、残留

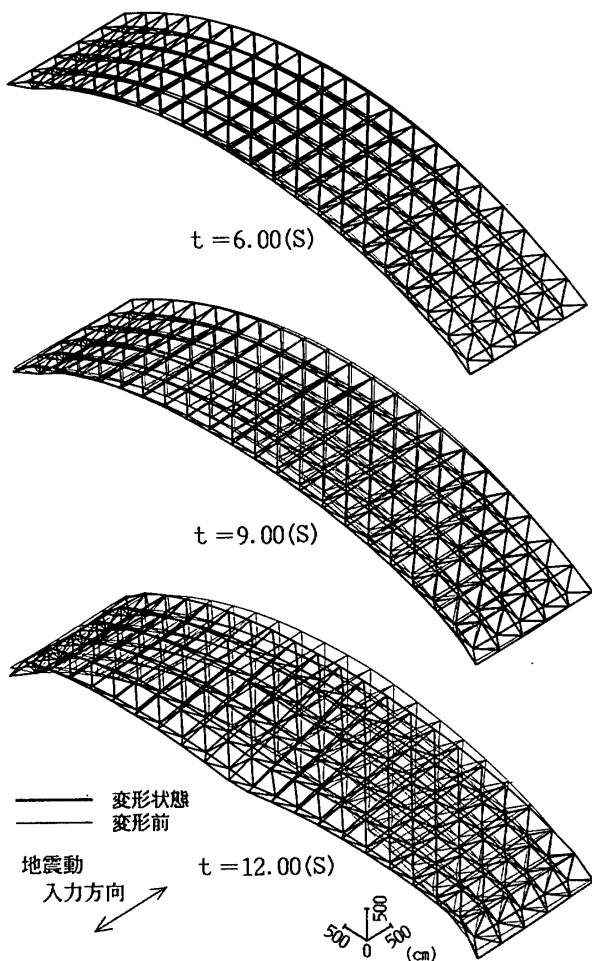
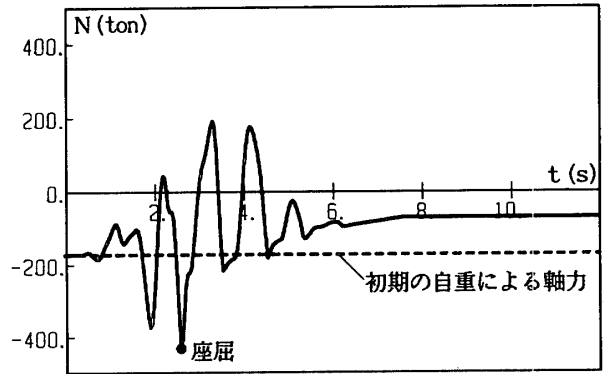


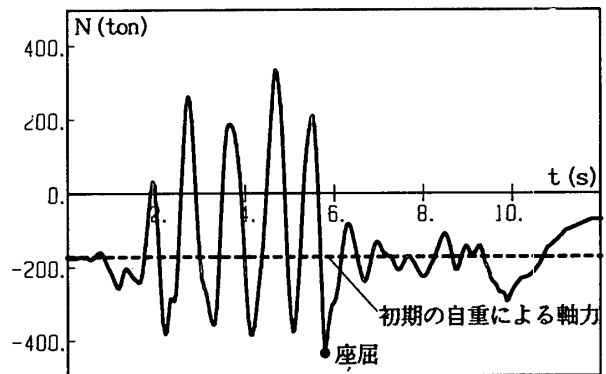
図-7 崩壊過程 ($L=B/4$) [変形倍率: 2倍]

変形が生じている。

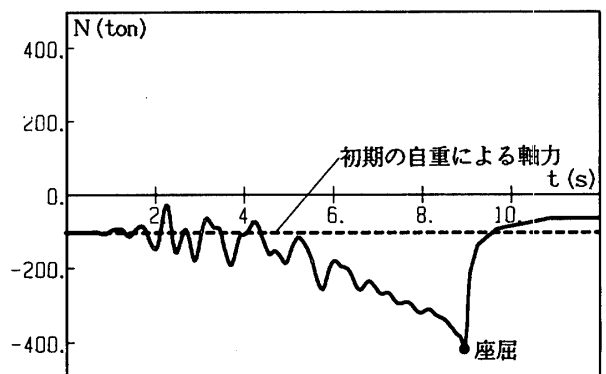
図-8に $L=B/4$ における支持点に近い下弦材および構造物中央の上弦材の軸力の時刻歴を示す。(a)が図中に示す部材2, (b)が部材6, (c)が部材9の軸力の時刻歴である。図中の点線は、初期の自重による軸力を表す。下弦材が座屈し耐力が低下するとともに上弦材の軸力は増加し、その後、座屈して耐力が急激に低下している。この上弦材の座屈により部材6の耐力も低下し、



(a) 部材2の軸力の時刻歴



(b) 部材6の軸力の時刻歴



(c) 部材9の軸力の時刻歴

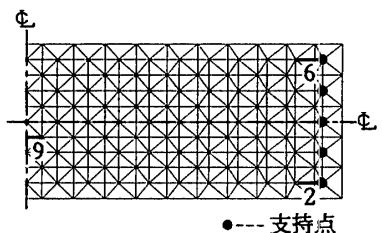
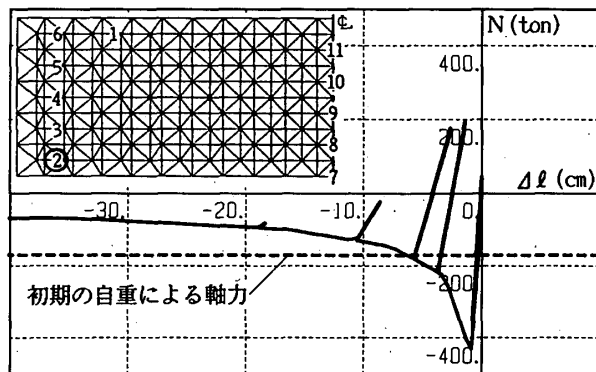


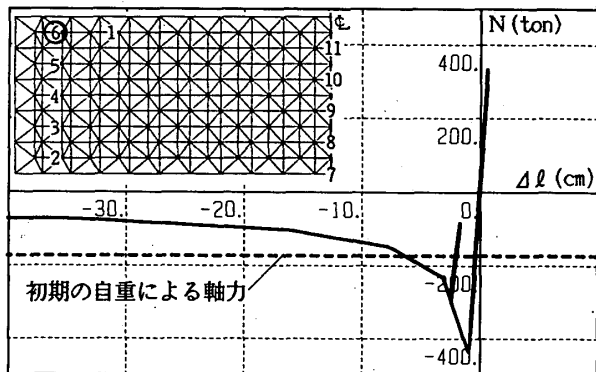
図-8 軸力の時刻歴 ($L=B/4$)

構造物の崩壊へ至っている。この部材 2, 部材 6 の軸力—軸伸縮関係をそれぞれ図—9 (a), (b) に示す。図中の部材番号は座屈の発生順位を示す。また、図中の点線は初期の自重による軸力を表す。部材 5 が座屈する前までは、部材 2—4 は (a) と同様な軸力—軸伸縮曲線を示しており、耐力が初期の自重による軸力以下になっても軸変形が急には進まない。しかし、部材 5 が座屈し耐力が初期の自重による軸力以下になると構造物全体は自重を支えきれなくなりこれらの部材の軸変形が急激に進んでいる。

図—10 に $L=B/2$ における支持点に近い下弦材および構造物中央の上弦材の軸力の時刻歴を示す。(a) が図中に示す部材 I, (b) が部材 II, (c) が部材 III の軸力の時刻歴である。同様に、 $L=B$ における支持点に近い下弦材の軸力の時刻歴を図—11 (a) に、その部材に隣接した支持点に近い下弦材および構造物中央の上弦材の軸力の時刻歴をそれぞれ図—11 (b), (c) に示す。各図中の点線は、初期の自重による軸力を表す。座屈した部材の耐力はほとんど下がっていない。また、座屈した下弦材の最終状態での軸力は初期の自重による軸力より小さくなっており、その部材に接合されているスパン方向の下弦材の軸力も小さくなっているが、隣接したスパン方向の弦材の軸力は、応力が再配分されるため大きくなっている。構造物中央の上弦材の軸力は、 $L=B/2$ では初期の自重による軸力より大きくなっているが、 $L=$



(a) 部材 2 の軸力—軸伸縮

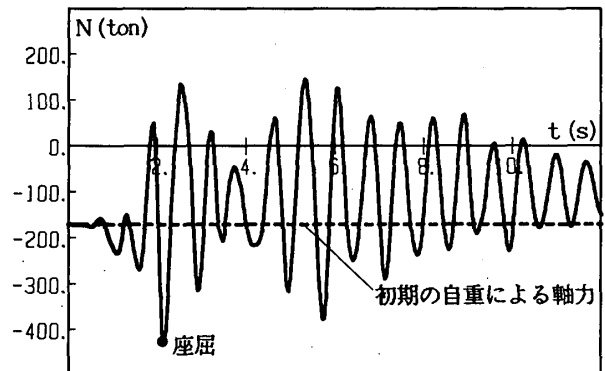


(b) 部材 6 の軸力—軸伸縮

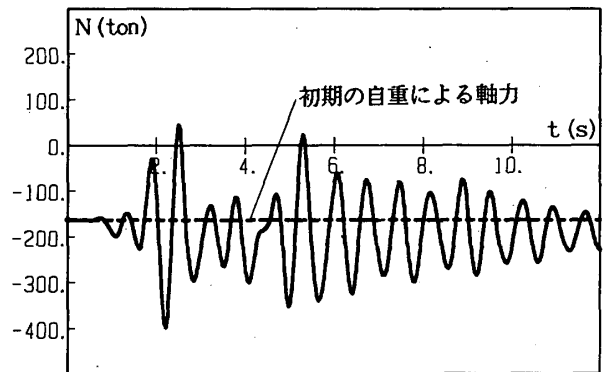
図—9 軸力—軸伸縮関係 ($L=B/4$)

B ではさほど変化していない。したがって、 $L=B/4$ では下弦材の座屈により上弦材の軸力が増加し、そのため座屈を生じ耐力が初期の自重による軸力より小さくなり崩壊へと至ったが、 $L=B/2$, B では上弦材や座屈していない下弦材等に余力があるため崩壊へと至らなかったことが分かる。

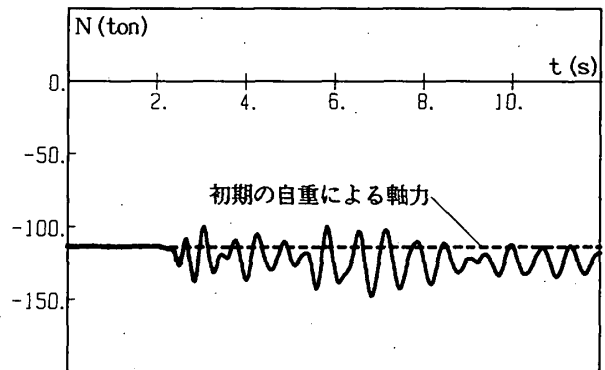
以上のことより、不静定構造物では、部材が座屈し耐力が初期の自重による軸力以下になっても、応力の再配



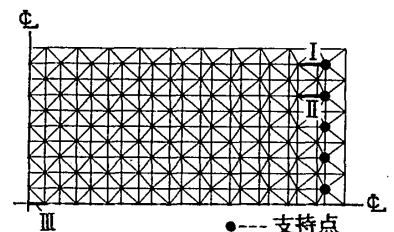
(a) 部材 I の軸力の時刻歴



(b) 部材 II の軸力の時刻歴



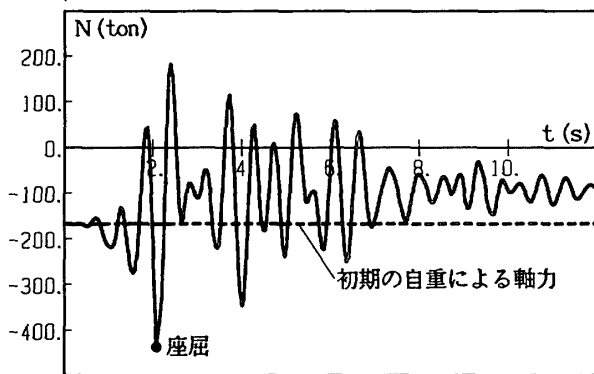
(c) 部材 III の軸力の時刻歴



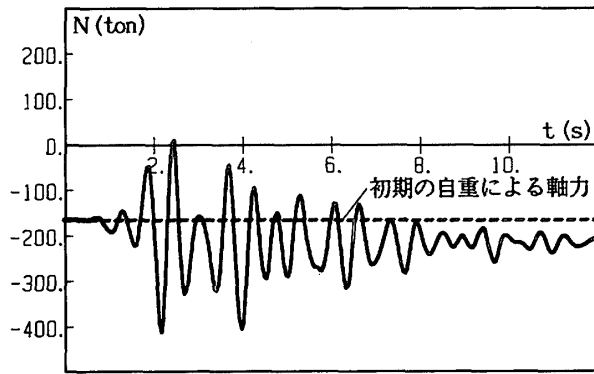
図—10 軸力の時刻歴 ($L=B/2$)

分が起りすぐには崩壊へとつながらず、さらに他の部材が座屈していくと自重を支えきれなくなり崩壊に至ることが分かる。

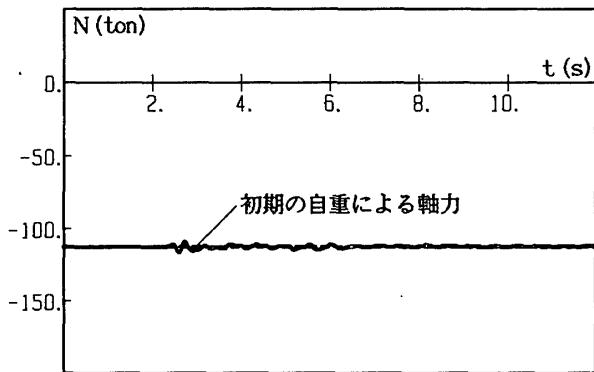
図-12 に $L=B/2$ について鉛直変位が最大となった



(a) 部材Ⅰの軸力の時効歴



(b) 部材Ⅱの軸力の時効歴



(c) 部材Ⅲの軸力の時効歴

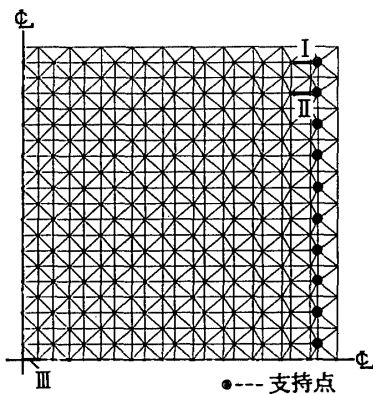


図-11 軸力の時刻歴 ($L=B$)

時の変形状態を示す。なお、変形は50倍に誇張して示している。図中、細線が変形前を表し、太線が変形状態を表す。スパン方向に対称、桁行方向に逆対称の変形状態となっている。

表-7 に各構成部材中での最大応答軸力を示す。桁行方向に水平動が働いた場合は、桁行方向の弦材、斜材にも大きな軸力が生じている。スパン方向の弦材は、下弦材では隅部、上弦材では桁行方向端部の中央で圧縮力が最大となっている。

§5. 結論

本論文では、大スパントラス構造物のうち一方向大スパン複層円筒トラス構造物を例にとり、部材の各節点に質量を設け全自由度を考慮したモデルを用い、部材の軸力-軸伸縮関係に座屈を考慮した地震応答解析を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 個々の部材の座屈までを考慮した地震応答解析が行えた。そのCPU時間は、300 MFLOPSのスーパーコンピュータ (ETA¹⁰) を使用して、 $\phi=30^\circ$, $L=B$ (本例題で最大規模の構造物) で34528秒であった。
- 2) 大スパントラス構造物に水平動が作用した場合には、逆対称モードが励起され、初期の自重時に大きな軸力を生じた部材とは違う部材に大きな軸力が働く。
- 3) 一般に、周辺に支持点を有する大スパントラス構造物では面内方向の剛性耐力が大きいため、水平地震動よりも上下地震動に対する影響が大きくなると言われているが、本例題のようにアーチの脚部のみが支持された構造物では、上下地震動よりも水平地震動に対する応答

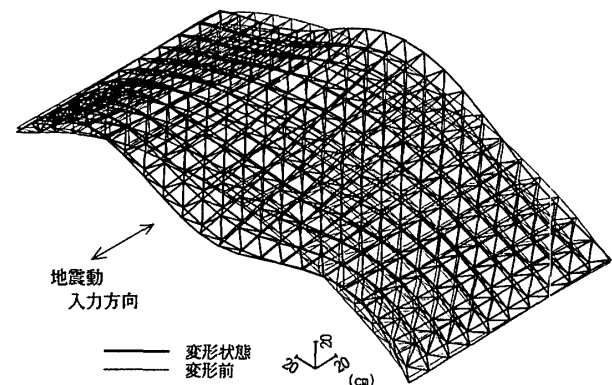


図-12 鉛直変位が最大時の変形状態 ($L=B/2$)
[変形倍率: 50倍]

表-7 最大応答軸力 (初期の自重による軸力を含む)

桁行長さ	上弦材		下弦材		斜材
	スパン方向	桁行方向	スパン方向	桁行方向	
B/4	-435	-48	-440	-161	-125
	199	94	538	236	123
B/2	-436	-52	-439	-24	-103
	269	33	327	31	102
B	-432	-129	-439	-83	-129
	275	131	272	88	133

が大きくなった。特に、桁行方向の長さが短い場合には、桁行方向の水平動に対して十分な注意が必要である。

4) 不静定構造物では、部材が座屈しその部材の耐力が初期の自重による軸力以下になっても、すぐには構造物の崩壊へとつながらず他の部材へ応力が再配分される。しかし、座屈した部材数が増えてくると構造物自体が自重を支えきれなくなり崩壊へと至る。

謝 辞

部材の軸力—軸伸縮関係に摂南大学教授柴田道生博士のプログラムを参考にさせて頂きました。研究費の一部に文部省科学研究費を使用しました。計算には東京工業大学総合情報処理センター内のETA¹⁰を使用しました。

関係者各位に深く御礼申し上げます。

Appendix 全自由度を考慮したモデルと質点を集約したモデルの応答に及ぼす影響

部材の各節点に質量を設け全自由度を考慮したモデルを用いた場合と質点を集約したモデルを用いた場合の構造物の動的挙動を比較する。

(1) 地震応答解析法

質点を集約することにより、(a-1) 式で示される集約した質点に関する運動方程式が得られる。

$$[M']\{\ddot{y}_{2n+1}\} + [C']\{\dot{y}_{2n+1}\} + [K'(t_n)]\{\Delta y_{2n}\} + \{F_n'\} = -[M'] \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_{cm+1} \\ \ddot{y}_{cm+1} \\ \ddot{y}_{cn+1} \end{Bmatrix} + \{Q'\} \dots \dots \dots (a-1)$$

ここで、

$$[C'] = 2h/w_1[K_1'] \quad (h=0.02)$$

$$[K'] = [K_{22}] - [K_{21}][K_{11}]^{-1}[K_{12}]$$

$$\{F_n'\} = \{F_{2n}\} - [K_{21}][K_{11}]^{-1}\{F_{1n}\}$$

$$\{Q'\} = \{Q_2\} - [K_{21}][K_{11}]^{-1}\{Q_1\}$$

添字 1 は消去される質点に関する成分を、添字 2 は集約する質点に関する成分を表す。

応答解析にあたっては、(a-1) 式より線形加速度法により $\{\Delta y_{2n}\}$ を求めた後、(a-2) 式より $\{\Delta y_{1n}\}$ を求める。

$$\{\Delta y_{1n}\} = -[K_{11}]^{-1}[K_{12}]\{\Delta y_{2n}\} - [K_{11}]^{-1}\{F_{1n}\} + [K_{11}]^{-1}\{Q_1\} \dots \dots \dots (a-2)$$

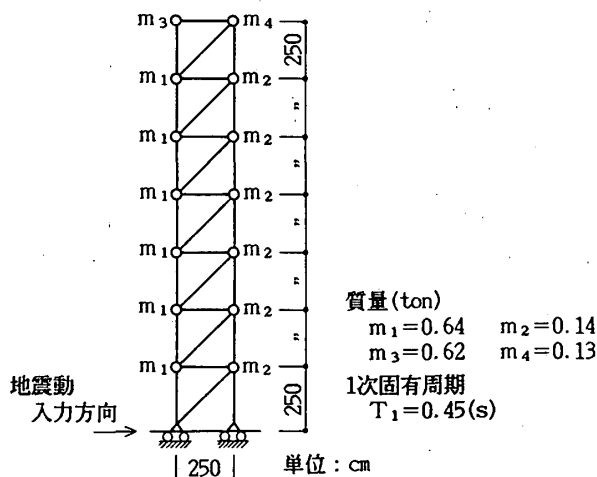
(2) 解析モデル

解析モデルは図—A1 に示すものである。左側質点と右側質点の質量比が 4.5 : 1.0 になるようにし、質点を集約する際は右側質点を消去し左側質点に質量を集約した。また、解析に用いた材料定数は 3.1 の表—2 と同値のものを使用し、部材の断面性能は表—A1 に示すものである。

入力波には、加速度の振幅が直線的に増大し 4 秒以降定常波となるような周期 0.8 秒、最大加速度 600 gal の sin 波を 6 秒間水平方向に入力した。

(3) 解析結果および考察

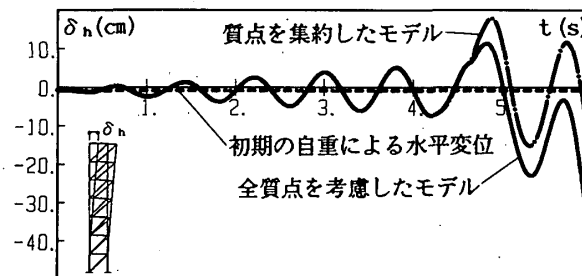
図—A2 に左側最上層の質点の水平変位の時刻歴を示す。図中、点線は初期の自重による水平変位を表し、実線が部材の各節点に質量を設け全自由度を考えたモデルを用いた場合、一点鎖線が質点を集約したモデルを用いた場合を表す。両者の結果



図—A1 解析モデル

表—A1 部材の断面性能

部材種類	材長 (cm)	外径 (cm)	厚さ (cm)	断面積 (cm ²)	断面2次半径 (cm)	細長比
水平材	250.0	21.63	0.7	46.03	7.40	33.79
鉛直材	250.0	8.91	0.4	10.69	3.01	82.99
斜材	353.6	8.91	0.4	10.69	3.01	117.48



図—A2 左側最上層の質点の水平変位の時刻歴

は、弾性範囲内ではよい対応を示すが、部材が座屈し塑性域に至ると応答変位に差が生じており、質点を集約することにより構造物の挙動を正確に表すことができない可能性がある。質点を集約する方法は、高次振動がなくなり計算の時間刻みを大きくすることができ計算時間を短縮することができ有益であるが、座屈を伴う弾塑性地震応答解析を行う際には、全節点に質量を設けたモデル化が必要であると考え、本論中では、全自由度を考慮したモデルを用いて解析を行った。

参考文献

- 1) 加藤史郎, 高島英幸, 西菌博美: 上下地震動を受ける矩形平面状の屋根型偏平球殻の応答性状, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 383 号, pp. 58~68, 昭和 63 年 1 月
- 2) 加藤史郎, 吉川健二, 横尾義貴: 上下地震動を受ける球殻の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1003~1004, 昭和 55 年 9 月
- 3) 加藤史郎, 横尾義貴, 長浜哲史: 上下地震動を受ける球殻の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1159~1160, 昭和 56 年 9 月
- 4) 真下和彦, 田中弥称雄, 原 道也: 片持コノイドおよび筒形シェルの動的特性に関する研究 (その 1), 日本建築学会論文報告集, 第 247 号, pp. 93~100, 昭和 51 年 9 月

- 5) 西村敏雄, 新宮清志: 上下動および水平動地震を受ける
裾梁付回転体シェルの動的応答に関する研究, 日本建築
学会論文報告集, 第 326 号, pp. 47~59, 昭和 58 年 4 月
- 6) 西村敏雄, 新宮清志, 後藤良和: 裾梁付回転体シェルの
地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集,
pp. 1155~1156, 昭和 56 年 9 月
- 7) 近藤一平, 田中弥称雄: Parabolic Velaroidal Shell の上
下動地震応答に関する考察, 日本建築学会大会学術講演
梗概集, pp. 265~266, 昭和 61 年 8 月
- 8) Tadaki SUGANO, Toshio KOBAYASHI, Koji KON-
DO: Seismic Design of a Long-span Space Structure,
Proceedings of the sessions related to seismic engineer-
ing at Structures Congress '89, pp. 368~377, May, 1989
- 9) 加藤史郎, 石川浩一郎, 横尾義貫: 大スパントラス構造
物の耐震性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告
集, 第 360 号, pp. 64~74, 昭和 61 年 2 月
- 10) 加藤史郎, 石川浩一郎, 横尾義貫: 上下地震動を受ける
トラス平板の耐震性について, 日本建築学会構造系論文
報告集, 第 370 号, pp. 60~68, 昭和 61 年 12 月
- 11) 大屋竹之: 立体骨組構造の地震応答 (その 1~その 6),
日本建築学会論文報告集
- 12) 柴田道生, 荒木秀幸: 区分線形化された復元力関数を用
いた筋違付架構の弾塑性解析 (その 1), 日本建築学会大
会学術講演梗概集, pp. 989~990, 昭和 61 年 8 月
- 13) 藤本盛久, 和田 章, 白方和彦, 小杉 立: 筋違付鉄骨ラ
ーメンの弾塑性解析に関する研究, 日本建築学会論文報告
集, 第 209 号, pp. 41~51, 昭和 48 年 7 月
- 14) 和田 章, 久保田英之: 部材の座屈および破断を考慮し
たトラス構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文報告
集, 第 396 号, pp. 109~117, 1989 年 2 月
- 15) 日本建築学会: 鋼構造設計規準, 昭和 63 年

(1989 年 12 月 10 日原稿受理, 1990 年 5 月 9 日採用決定)