

複合ケーブル構造の動的応答

高 重 伯^{*1}

概要

風による複合ケーブル構造の動的性状に関する問題は、細分するとさらに二つに分かれる。最初に、複合ケーブル構造がある風速地域でその平衡状態を変化させることができるが、つまり不安定になるか、ならないかの問題であり、次に、もし不安定になるとした場合、振幅がどの程度にまで達するかという問題である。前者は風による安定問題、後者を風による応答問題と普通呼んでいる。本研究は以上のようなことのもとに、複合ケーブル構造の振動性状を明らかにすることを究明するうえで、さらに開発された理論解析を通して、解析法での線形と非線形の特性について、相互関係などの基礎的な事項を解明しようとするものである。

1. 研究目的

1988年 3月、日本初の屋根つき球場である東京ドーム(Dome)が竣工しました。韓国では1988年オリンピック(Olympic)のため複合ケーブル構造のドーム(Dome)を使用しました。また、韓国では今後地方博覧会を催す計画があるにもかかわらず、膜構造というものが広く知られてない。それは、まだ他の構造に比べて研究の歴史は浅く、未解決の問題も多く残されている。

複合ケーブル構造は、今までの大スパン(Span)構造物に対して究めて合理的、かつ経済的な構造システム(System)である一方、軽量で剛性が高いという特性を持っている。このため、空気膜構造に比べば変形しにくく変形量が小さい、解析に非線形性(形態)が要求されるという問題がある。したがって、地震力よりも風圧力や積雪荷重による応力や変形が問題となる。特に、風圧力による膜面の動的応答は、その非線形性に

加えて部材が圧縮力を負担しないという片側応力の問題であるため、その挙動は正確に把握することは困難であり、まだまだ研究途上の段階である。振動解析方法としては二つに分類される。一つは線形解析、もう一つは非線形解析である。本研究では複合ケーブル構造の自由振動の数値解析を線形と非線形に分けて試み、複合ケーブル構造の風に対する線形解析と非線形解析との比較により、今後の複合ケーブル構造の動的応答に関する研究の基礎となることを目的とする。

2. 解析理論

本研究においては次の前提にもとずいて数値解析を行なう。

1) 研究の対象となっている複合ケーブル構造においては一般に膜材に比べてケーブル(Cable)の剛性が非

*1 横浜国立大学工学部計画建設学科博士課程

常に高い。そこで、応力はすべてケーブル (Cable) が負担するものとする。

- 2) すべての荷重は節点にかかるものとする。部材の自重も節点ごとの集中荷重として扱う。
- 3) 材料は張力が生じている範囲においては常に弾性範囲で、応力と歪は線形関係にあるものとする。
- 4) 振動は、強制変位による自由振動とし、減衰は考えない。

複合ケーブル構造のような線材 (ケーブル) 要素を用いる場合にはLM法で十分であると判断し、質量マトリックス (Matrix) にはLM法を用いることにしてある。線材要素の場合、LM法では部材の質量を 1/2ずつ材端の節点に分配する。このときX、Y、Z 方向すべてに集中質量として加える。

2.1 モード (Mode) 解析とシミュレーション (Simulation) 解析

複合ケーブル構造の運動式は

$$M \ddot{u} + K u = 0 \quad \dots (1)$$

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = f(t) \quad \dots (2)$$

なお、上式において $M \ddot{u}$ は慣性力、 $C \dot{u}$ は振動を妨げるようとする減衰力、 $K u$ は部材の弾性力、つまり各節点がそれぞれの変形方向に戻ろうとする復元力である。

自由振動の場合で考えると、変位 u により、部材に復元力 $K u$ が生じ、それに見合うだけの加速度 \ddot{u} が生じ運動を始めるという仕組みである。

構造物の動的応答を求めるには、(1)、(2) などの運動方程式を解けばよいわけであるが、これらの式は変位 u に関する微分方程式である。1 自由度自由振動問題の場合、代数方程式

$$m \mu = k \quad \dots (3)$$

の解 μ を用いると、微分方程式 (1) の解は、
 $u = a \sin(\sqrt{\mu} t) + b \cos(\sqrt{\mu} t) \quad \dots (4)$
 で与えられる。

(8) を 2 段階微分して \ddot{u} を作り (1) に代入してみれば解ける。多自由度の場合は、運動方程式が (5) の自由振動のとき、代数方程式 (7) に相当するものは、

$$kx = \lambda Mx \quad \dots (5)$$

であり、上の関係式を満たすスカラー (Scalar) λ とベクトル (Vector) x は、それぞれ固有値、固有ベクトル (Vector) と呼ばれるもので、行列の大きさ (自由

度数) だけ存在する。この λ 、 x を用いると、

$$U = (a \sin(\sqrt{\lambda} t) + b \cos(\sqrt{\lambda} t)) X \quad \dots (6)$$

は、微分方程式 (1) の解になる。このことは、(6) を微分して (1) に代入すれば容易に解ける。このような a 、 b 、 λ 、 x の組み合わせが自由度 n 存在するわけであるので (1) の一般解はそれぞれの和

$$U = \sum_k (a_k \sin \sqrt{\lambda_k} t + b_k \cos \sqrt{\lambda_k} t) X_k \quad \dots (7)$$

n : 自由度

$$a_k : X_k^T M \dot{u}(0) / X_k^T M X_k$$

$$b_k : X_k^T M u(0) / X_k^T M X_k$$

で与えられる。このように行列の固有値、固有ベクトル (Vector) を何らかの方法で求め、(6) で表わされる。それぞれの固有振動の重ねあわせによって動的応答の解析を行なう方法のことを、モード (Mode) 解析という。

一方、1 自由度の自由振動において、時間 t における変位、速度、加速度をそれぞれ $U(t)$ 、 $\dot{U}(t)$ 、 $\ddot{U}(t)$ と表わし、 Δt 秒後の変位および速度をテーラー (Taylor) 展開の第 2 項まで次式のように近似すれば、

$$U(t + \Delta t) = U(t) + \dot{U}(t) \Delta t \quad \dots (8)$$

$$\dot{U}(t + \Delta t) = \dot{U}(t) + \ddot{U}(t) \Delta t \quad \dots (9)$$

(3) の運動方程式より

$$\ddot{U}(t) = -(K/m) U(t) \quad \dots (1)$$

であるので、初期条件 $U(0)$ 、 $\dot{U}(0)$ より、

$$\ddot{U}(0) = -(K/m) U(0) \quad \dots (A)$$

$$U(\Delta t) = U(0) + \dot{U}(0) \Delta t \quad \dots (B)$$

$$\dot{U}(\Delta t) = \dot{U}(0) + (A) \Delta t \quad \dots (C)$$

$$\ddot{U}(\Delta t) = -(K/m) (B) \quad \dots (D)$$

$$U(2\Delta t) = (B) + (C) \Delta t \quad \dots$$

$$\dot{U}(\Delta t) = (C) + (D) \Delta t \quad \dots$$

と、逐次動的応答を求めることができる。このような方法を、シミュレーション (Simulation) 解析という。

2.2 ニューマーク (Newmark) の β 法

本研究では、複合ケーブル構造の非線形を行なうために、ニューマーク (Newmark) の β 法を基盤として採用する。

$$U(t + \Delta t) = U(t) + \Delta t \dot{U}(t) + \{ (\Delta t)^2 / 2 \} \ddot{U}(t) + \beta (\Delta t)^2 \{ \ddot{U}(t + \Delta t) - \ddot{U}(t) \} \quad \dots (10)$$

$$\ddot{u}(t+\Delta t) = \ddot{u}(t) + \Delta t \{ \ddot{u}(t) + \ddot{u}(t+\Delta t) \} / 2 \quad \dots (11)$$

としてシミュレーション (Simulation) を行なう方法である。(10)における β は、公式の性格を調節するためのパラメータで、 $0 \leq \beta \leq 1/2$ の範囲の値を与える。ここでは、

$$\beta = 1/6 \quad \dots (12)$$

に固定する。このとき(10)、(11)は、“時刻 t から $t+\Delta t$ までの間加速度が時間に対して1次式の形で変化する”と仮定した近以となる。そういう意味でのこの $\beta = 1/6$ の時を特に、線形加速度法という。

この方法では、変位を計算するときに速度を2次式、速度を計算するときに加速度を1次式とするので、変位計算の時に速度一定、速度計算のときの加速度一定とするオイラー法(Euler)に比べ、精度の点でかなり有利になると思われる。

一方、運動方程式は、減衰のない自由振動とするので、(1)を採用する。以上の(10)、(11)、(1)の3式を用いて、微小時間 Δt 秒ごとにシミュレーション (Simulation) を行なっていく。

解析法には直接法と反復法の2通りの解法が考えられるが、ここでは後者の反復法を用いる。

反復法の手順を示す。

- ①、 $\ddot{u}(t+\Delta t)$ の第1近以を作る。

$$\text{例) } \ddot{u}(t+\Delta t) = \ddot{u}(t)$$

- ②、①で作った近以値を(17)、(18)に代入し $U(t+\Delta t)$ 及び $\dot{u}(t+\Delta t)$ を計算する。

- ③、②の結果を運動方程式(5)に代入し $U(t+\Delta t)$ のよりよい近以を作る。

$$\ddot{u}(t+\Delta t) = -M^{-1}KU(t+\Delta t)$$

- ④、収束の判定をする。していなければ再び②へ戻る。

3. 数値解析

本節では、本構造の実際のをモデル(Model)化して、振動解析を行い。前に述べた非線形の解析と線形解析理論を比較し、その正当性と妥当性を検証するとともに、初期張力状態による因子が振動に与える影響を考案し、本構造の振動特性を探る。

複合ケーブル構造と言うのは本来、ケーブル(Cable)とポスト(Post)を合わせた複合構造で、様々な要素が本構造の特性に影響を与えている。つまり、複合ケーブル構造の静的状態を与えた様々な要素が振動

ではどのような影響与えるのかを把握し、複合ケーブル構造の動的応答を求めようというものである。

3.1 基本解析モデル(Model) 設定

座標空間に示す複合ケーブル構造を考える。曲面の対称性を利用すれば、X-Y平面における1/2曲面のみについて雪荷重 60kg/m^2 に対する静的解析を行い、複合ケーブル構造の初期張力状態を求め、風荷重に対する静的解析を行う。その時それぞれの節点に変位が見られる。総節点数65、要素数124である。

それを振動解析を行うときにはY-Z方向だけ設けて、風荷重による静的解析で得た変位をZ方向正(↑)に強制変位させた状態を初期状態として、自由振動させる。この初期強制変位量の違いにより、線形解析と非線形解析との違いに関する解析を行う。

基本モデル(Model)の一覧表

	スパン長さ	ライズ比	ポスト数
基本モデル	100M	1/10	7

	A(M)	B(M)	C(M)	D(M)	E(M)	F(M)
基本モデル	7.0	10.0	14.0	13.5	12.5	10.0

基本モデルの節点番号及び要素番号

1, 2, 3 ... : 節点番号

①, ②, ③ ... : 要素番号

ヤング率: $1,500,000 \text{ kg/cm}^2$

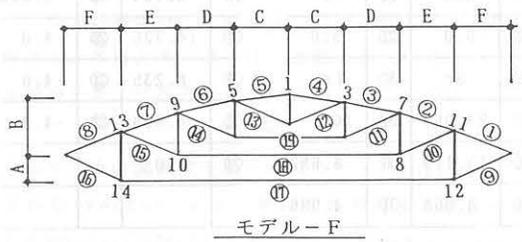
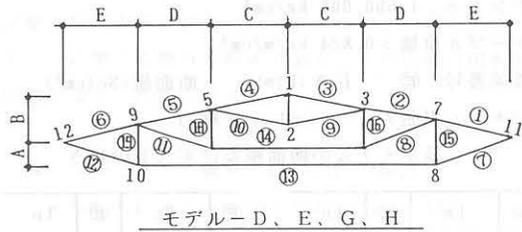
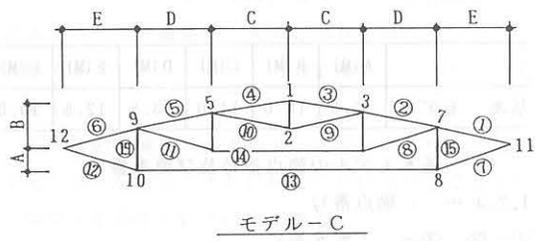
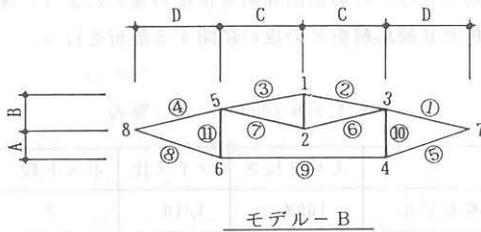
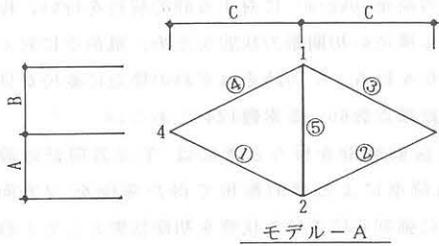
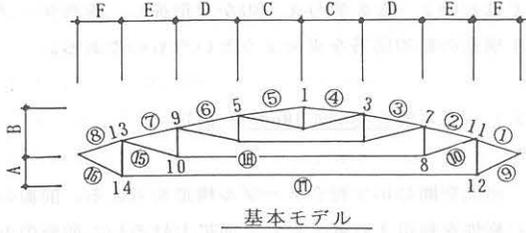
ケーブル重量: 0.824 kg/m/cm^2

要素番号: ⊕ 長さ: L(m) 断面積: Sc(cm²)

(+) : 引張力 (-) : 圧縮力

基本モデルの断面積及びポストの長さ

⊕	Ln	⊕	Ln	⊕	Sc	⊕	Ln
⑭	8.8	⑳	7.4	④	5.764	㉔	2.290
⑳	6.0	㉓	5.0	⑪	14.736	㉗	-8.0
⊕	Sc	⊕	Ln	⑫	8.235	㉘	-4.0
①	23.067	⑨	16.1	⑮	4.809	㉙	-4.0
②	13.179	⑩	8.682	㉚	-4.0		
③	8.068	⑪	4.996				



基本モデル初期張力ケーブル剛比表

要素番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
剛比	10	6	4	3	3	4	6	10	7	4
要素番号	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱		
剛比	2	1	1	2	4	7	6	4	2	

3.2 解析法の比較

解析結果より、各解析法を比較し、線形解析と非線形解析の正当性と妥当性を検証する。

基本モデル1は屋根の高さを地表面より30m、基本モデル2は屋根の高さを地表面1mに仮定して風に対する本構造の各節点の変形を求めたものである。その時、風に対する基準法は

$$q = 60(h)^{1/2}$$

q : 風圧 h : 高さ

基本モデル1に対しては、初期変位が節点番号1では177cm、節点番号3では177cm、節点番号7では150cm、節点番号11では81cmである。スパン(Span)に対する変位は1.7/100である。これらすべてのグラフでモード解析結果と線形シミュレーション(Simulation)解析結果は、完全に一致しているのが見られる。基本モデル(Model)2に対しても、初期変位が節点番号1では15.8cm、節点番号3では16.6cm、節点番号7では15.8cm、節点番号11では6.9cmである。

スパン(Span)に対しては1.6/1000である。これらすべてでも基本モデル(Model)1のようにモード(Mode)解析結果と線形シミュレーション(Simulation)解析結果が、完全に一致しているのが見られる。

スパン(Span)に対する変形比が1.7/100である基本モデル(Model)1での線形解析と非線形解析を見ると、振幅、周期ともに各解析法でかなり違った結果となっている。しかし、スパン(Span)に対する変形比が1.6/1000である基本モデル(Model)2での線形解析と非線形解を見ると、振幅、周期ともが基本モデル(Model)1と違ってほぼ一致している。

3.3 各モデル(Model)設定

ここでは、複合ケーブル構造をモデル(Model)化した振動解析を行なう。各モデル(Model)の線形解析

と非線形解析を比較し検証するとともに、複合ケーブル構造の動的応答特性を探索。

ここで、本構造の振動は線形解析と非線形解析との差を比較することによって本構造の振動に対する解析法を究明することとともに、本構造に与える初期条件などが本構造の振動にどのような影響を与えるのかを把握することが目的である。

振動は、複合ケーブル構造の中心点（節点番号1）をZ方向に強制変位させた状態を初期状態として自由振動させる。この初期強制変位量、及び、高低差（スパン(Span)に対するライズ(Rise)、初期張力、ポスト(Post)数、ポスト(Post)長さなどの違いによるモデルを設定して、これについて解析を行なう。

モデル種類	スパンの長さ	ライズ比	ポスト数
モデル A	10 (M)	1/10	1
モデル B	25 (M)	1/10	3
モデル C	42 (M)	1/10	5
モデル D	54 (M)	1/20	5
モデル E	54 (M)	1/10	5
モデル F	54 (M)	1/10	7
モデル G	54 (M)	1/10	5
モデル H	54 (M)	1/10	5

解析モデル (Model) の一覧表

モデル 種類	A (M)	B (M)	C (M)	D (M)	E (M)	F (M)
モデルー A	2.5	2.5	5.0			
モデルー B	1.7	2.5	6.25	6.25		
モデルー C	2.5	4.2	7.0	7.0	7.0	
モデルー D	2.1	5.4	9.0	9.0	9.0	
モデルー E	2.5	2.7	9.0	9.0	9.0	
モデルー F	3.1	5.4	6.75	6.75	6.75	6.75
モデルー G	2.1	5.4	9.0	9.0	9.0	
モデルー H	3.1	5.4	9.0	9.0	9.0	

各モデルの節点番号及び要素番号

1, 2, 3 ... : 節点番号

①, ②, ③... : 要素番号

ヤング率: 1,500,000 kg/cm²

ケーブル重量: 0.824 kg/m/cm²

要素番号: ㊸ 長さ:L(m) 断面積:Sc(cm²)

モデル Aの断面積

㊸	Sc	㊸	Sc	㊸	Sc	㊸	Sc
①	5.0	②	5.0	⑤	-10.0		
③	5.0	④	5.0				

モデル Bの断面積及びポストの長さ

㊸	Sc	㊸	Sc	㊸	Sc	㊸	Sc
①	3.228	②	1.671	⑩	5.764	⑪	2.290
⑤	2.484	⑥	1.551	㊸	Ln	㊸	Ln
⑨	1.502	⑩	-10.0	⑩	3.0	⑪	2.5

モデル Cの断面積及びポストの長さ

㊸	Sc	㊸	Sc	㊸	Sc	㊸	Sc
①	3.356	②	2.117	17	-10.0		
③	1.129	⑦	2.218	㊸	Ln	㊸	Ln
⑧	1.462	⑨	0.987	⑮	4.0	⑯	3.5
⑬	2.086	⑭	1.401	⑰	2.8		
⑮	-10.0	16	-10.0				

モデル Dの断面積及びポストの長さ

㊸	Sc	㊸	Sc	㊸	Sc	㊸	Sc
①	2.311	②	1.120	⑰	-10.0		
③	0.442	⑦	2.055	㊸	Ln	㊸	Ln
⑧	1.183	⑨	0.670	⑮	4.0	⑯	3.5
⑬	1.199	⑭	1.163	⑰	2.8		
⑮	-10.0	⑯	-10.0				

モデル Eの断面積及びポストの長さ

㊸	Sc	㊸	Sc	㊸	Sc	㊸	Sc
①	2.661	②	1.833	⑰	-10.0		
③	2.231	⑦	1.128	㊸	Ln	㊸	Ln
⑧	0.834	⑨	0.609	⑮	3.5	⑯	3.0
⑬	1.086	⑭	0.820	⑰	2.5		
⑮	-10.0	⑯	-10.0				

モデル F の断面積及びポストの長さ

①	Sc	②	Sc	③	Sc	④	Sc
①	4.274	②	2.007	⑤	Ln	⑥	Ln
③	1.729	④	0.923	⑦	Ln	⑧	Ln
⑤	2.007	⑥	1.524	⑨	Ln	⑩	Ln
⑦	1.129	⑧	0.811	⑪	Ln	⑫	Ln
⑨	1.817	⑩	1.419	⑬	Ln	⑭	Ln
⑪	1.076	⑫	-10.0	⑮	Ln	⑯	Ln

モデル H の断面積及びポストの長さ

①	Sc	②	Sc	③	Sc	④	Sc
①	2.742	②	1.635	⑤	Ln	⑥	Ln
③	0.900	④	1.739	⑦	Ln	⑧	Ln
⑤	0.126	⑥	0.738	⑨	Ln	⑩	Ln
⑦	1.643	⑧	1.079	⑪	Ln	⑫	Ln
⑨	-10.0	⑩	-10.0	⑬	Ln	⑭	Ln

各モデルの初期張力ケーブル剛比表

	モデルB	モデルC	モデルD	モデルE	モデルF	モデルG	モデルH
①	7.9	8.6	5.5	6.4	10.6	10.8	6.6
②	4.1	5.1	2.6	4.3	7.0	5.1	3.8
③	4.1	2.7	1.0	2.9	4.2	2.0	2.1
④	7.9	2.7	1.0	2.9	2.2	2.0	2.1
⑤	6.1	5.1	2.6	4.3	2.2	5.1	3.8
⑥	3.8	8.6	5.5	6.4	4.2	10.8	6.6
⑦	3.8	5.2	5.2	2.9	7.0	10.3	4.4
⑧	6.1	2.9	2.9	2.1	10.6	5.7	2.8
⑨	5.9	1.6	1.6	1.5	5.3	3.1	1.8
⑩		1.6	1.6	1.5	4.0	3.1	1.8
⑪		2.9	2.9	2.1	2.9	5.7	2.8
⑫		5.2	5.2	2.9	2.0	10.3	4.4
⑬		5.2	5.1	2.8	2.0	10.0	4.2
⑭		3.5	2.9	2.1	2.9	5.6	2.4
モデルA				⑮	4.0		
①	7.9			⑯	5.3		
②	4.1			⑰	4.0		

③	4.1			⑱	3.7		
④	7.9			⑲	2.7		

ここで示されるつり合い状態は、最初の形態のものを同一条件で引っ張ることにより張力を導入してある。

モデルGはモデルDのつり合い状態で、全ケーブル(Cable)の張力を約2倍にしたものであり、それ以外のものは同様である。

モデルHはモデルDより、全ポスト(Post)長さを各々1(M)ずつ長くしたものであり、他のことは同様である。

モデル1はモデルA-Hの頂部点(節点番号1)をスパン(Span)の1/1000強制変位させた場合のそれぞれ節点の変位である。

モデル2はモデルB-Hの頂部点(節点番号1)をスパン(Span)の1/500強制変位させた場合のそれぞれ節点の変位である。

モデル3はモデルA-Hの頂部点(節点番号1)をスパン(Span)の1/100強制変位させた場合のそれぞれ節点の変位である。

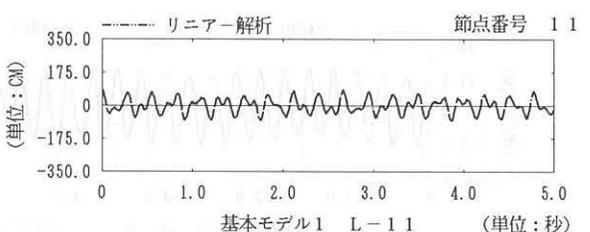
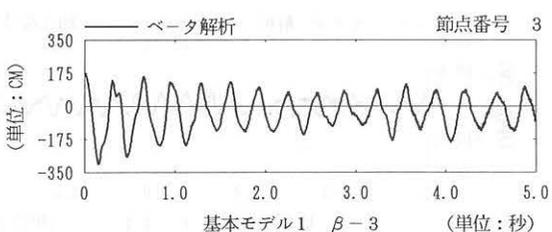
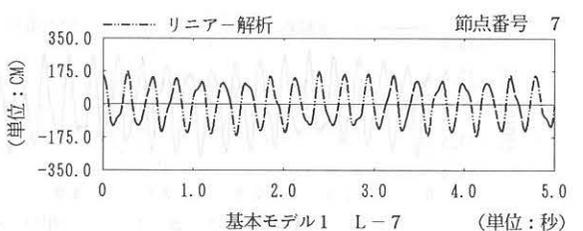
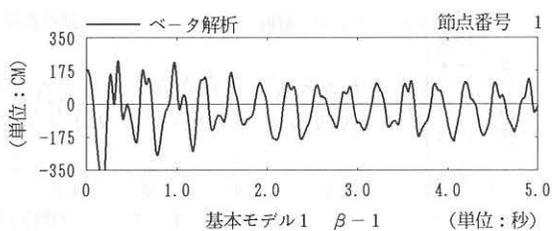
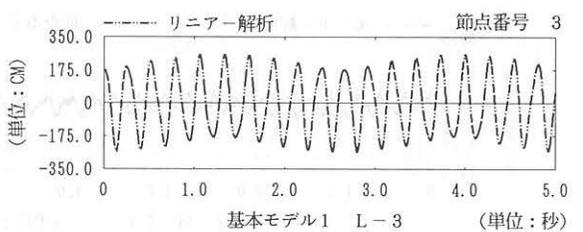
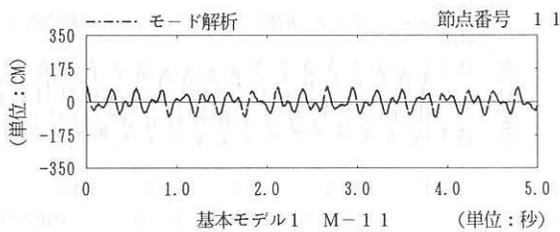
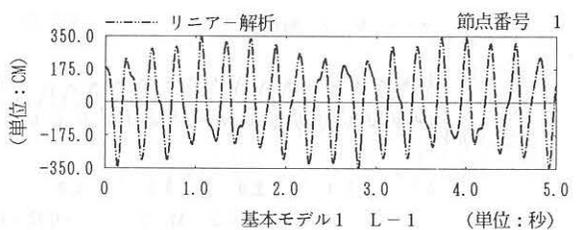
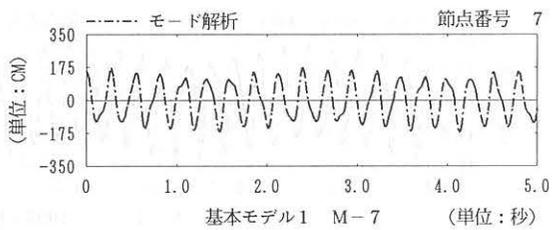
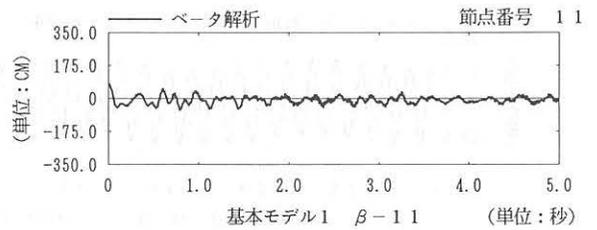
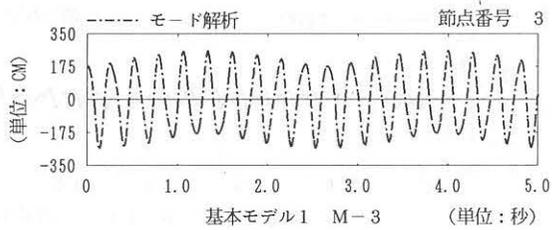
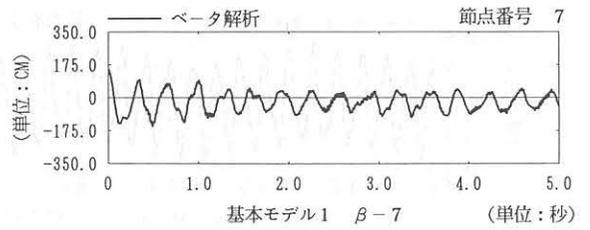
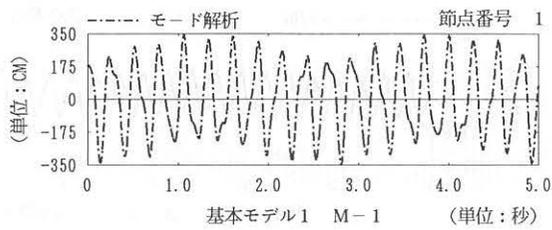
3.4 各解析法の比較

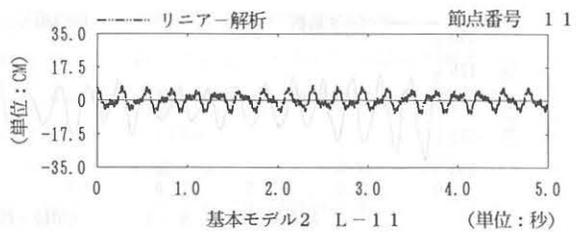
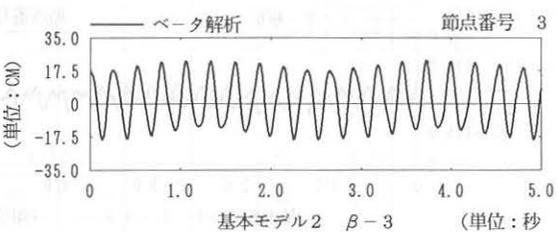
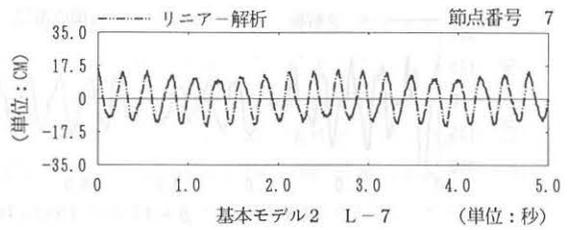
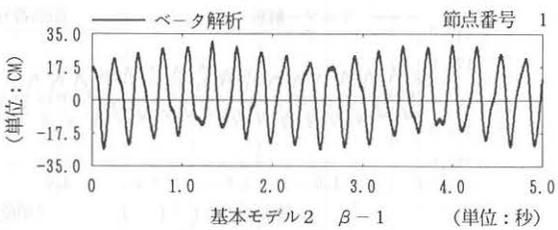
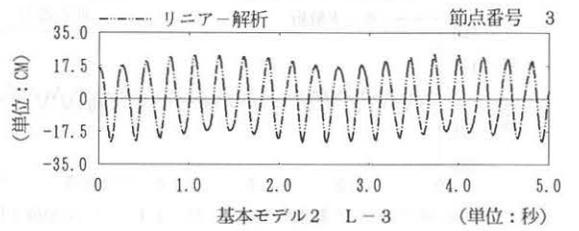
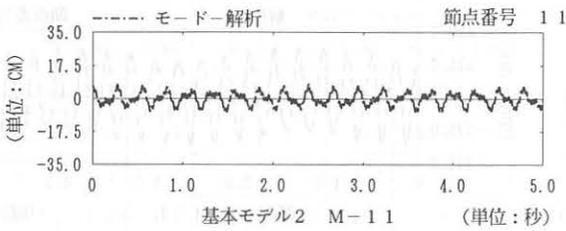
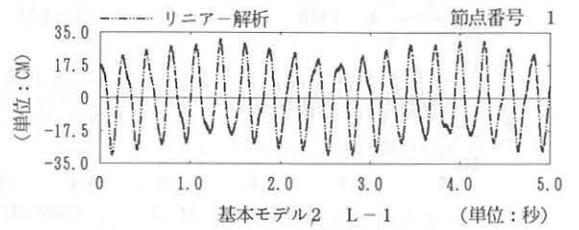
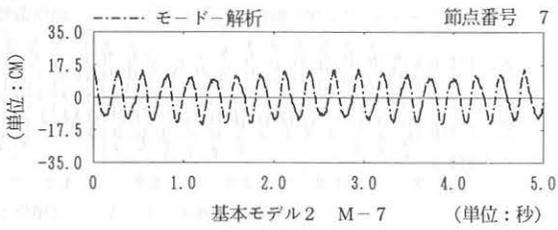
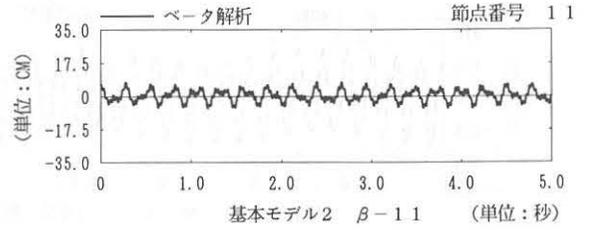
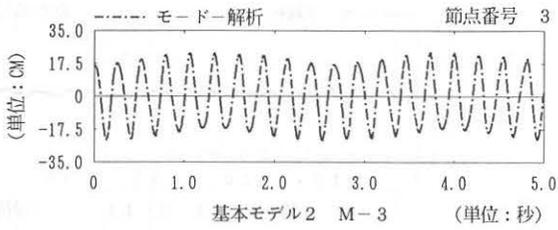
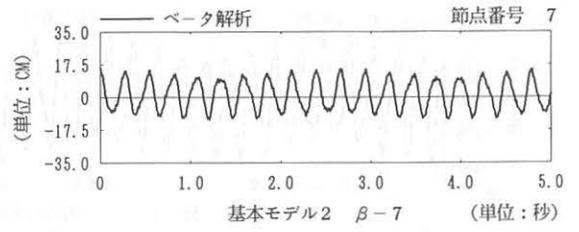
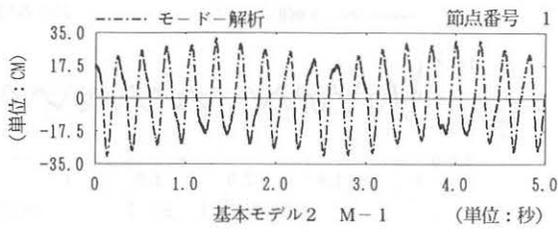
*モデル(Model) 1

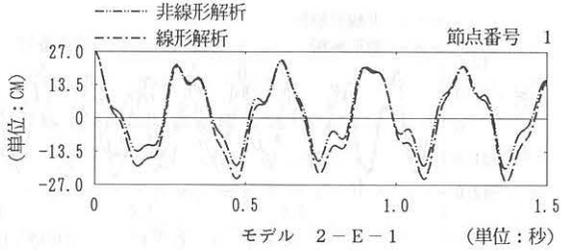
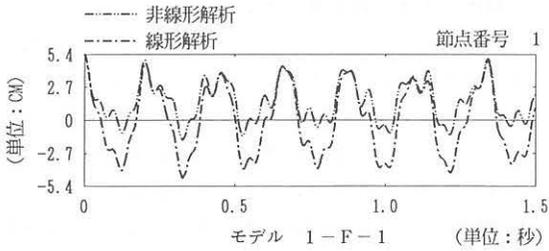
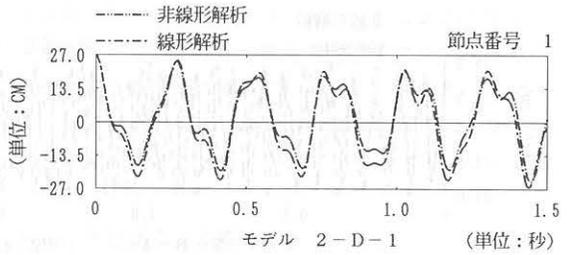
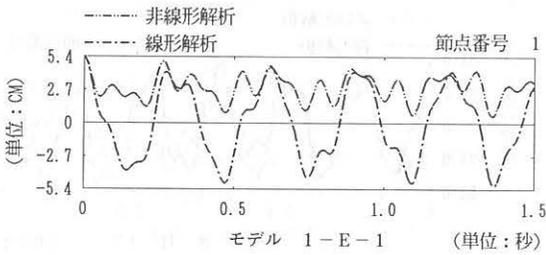
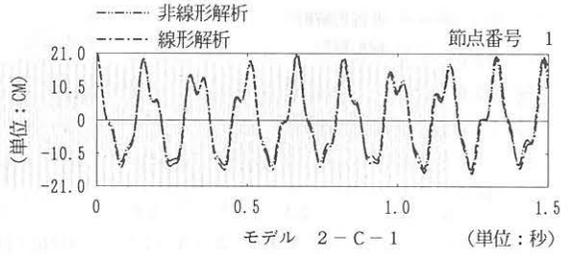
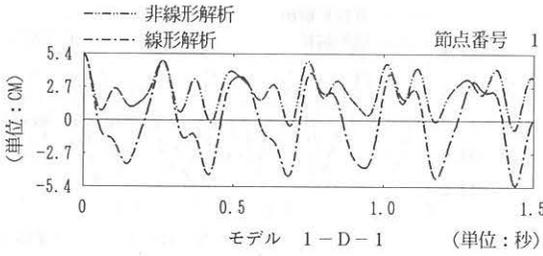
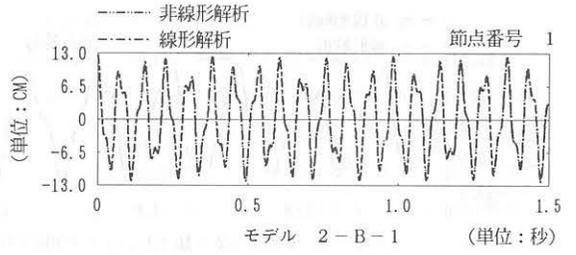
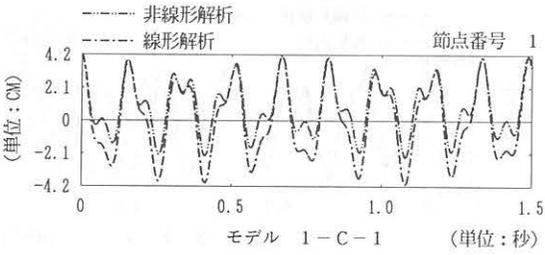
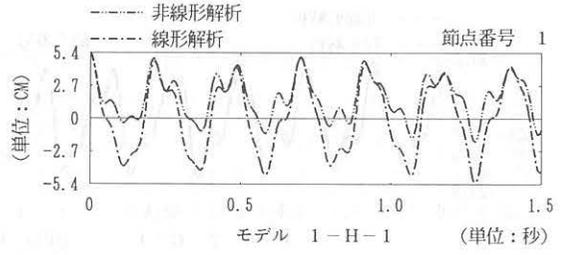
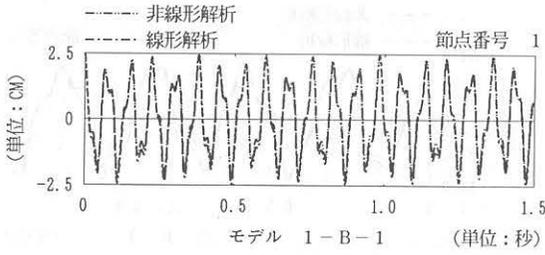
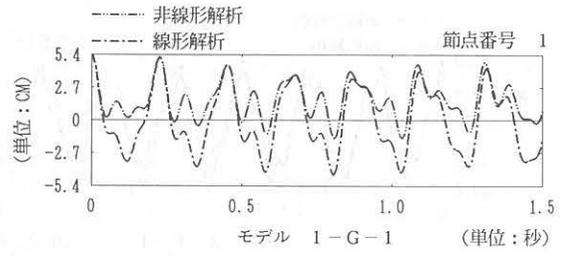
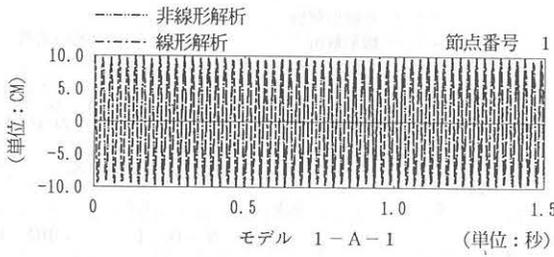
モデルA、モデルBは線形解析と非線形解析の固有周期が一致している。モデルCの場合もそれぞれ節点での振動数は一致している。モデルCとモデルDはスパン(Span)の長さが違うことによって、スパン(Span)の長さが短いモデルCでの振動数が高くなっている。

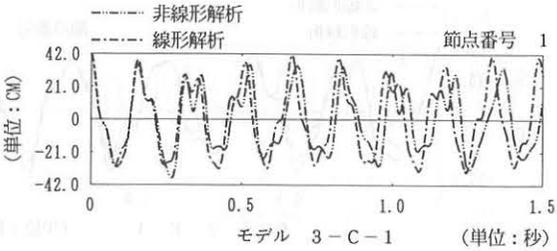
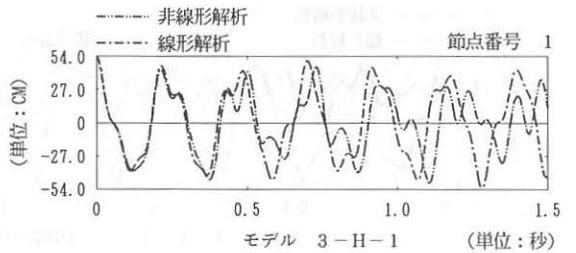
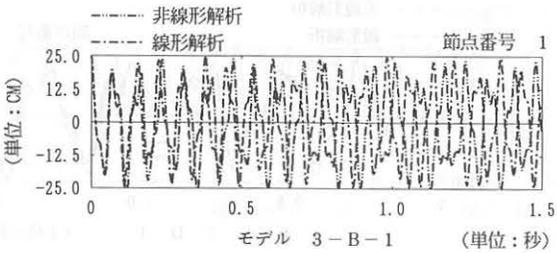
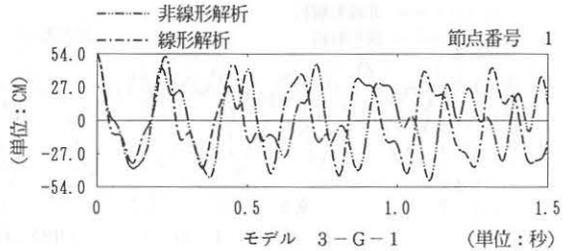
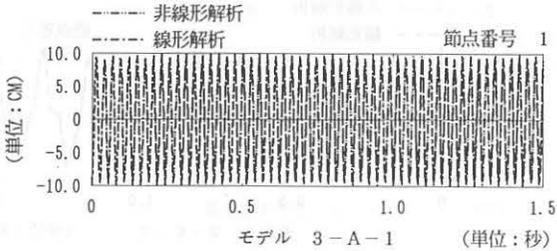
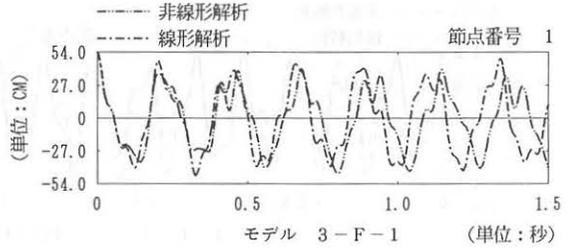
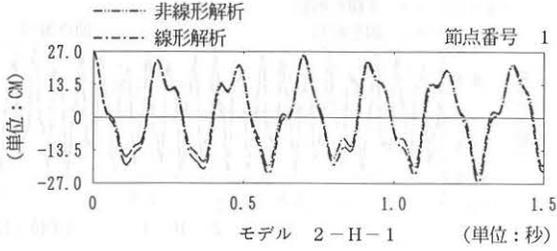
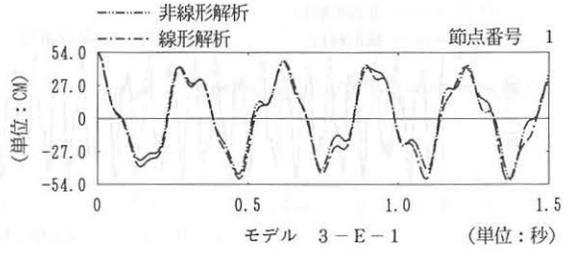
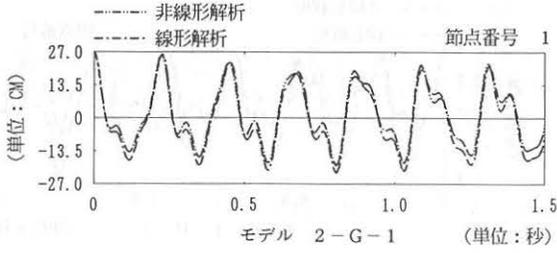
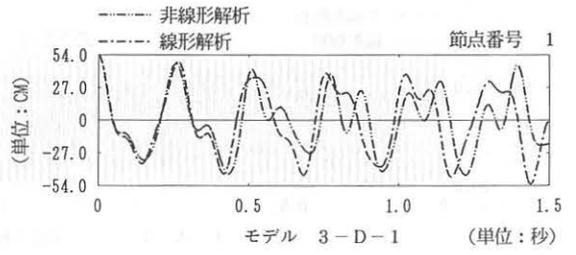
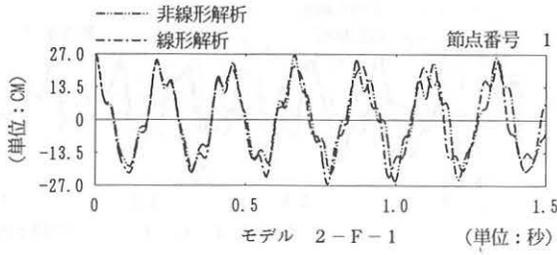
モデルD、モデルEは同一条件でスパン(Span)に対するライズ(Rise)比が1/20、1/10の違いであり、それに対して振動数はライズ(Rise)比が1/20、モデルDの振動数が高く表してある。モデルDでは線形解析と非線形解析との時間のずれ差が75/1000秒であり、振動数ではほぼ一致している。モデルEでは線形解析と非線形解析との時間のずれが9/1000秒であり、振動数ではほぼ一致している。

モデルFでは線形解析と非線形解析との時間ずれの差が最も大きいところで9/1000秒である。モデルFはモデルDよりポスト(Post)の数が2つ多いであるが、









振動数は高く、周期は短い傾向である。

モデルGでは線形解析と非線形解析との時間ずれの差が最も大きいところで6/1000秒である。モデルGがモデルDより初期張力が2倍であるが、振動数は高く、周期は短い傾向である。

モデルHでは線形解析と非線形解析との時間ずれの差が最も大きいところで9/1000秒である。モデルGはモデルDよりそれぞれのポスト(Post)での長さが1M長いもので、振動数は高く、周期は短い傾向である。

*モデル(Model) 2

モデル1がスパン(Span)に対する変位量が1/1000、モデル2はスパン(Span)に対する変位量が1/500である。モデル2での各モデル(B~H)はモデル1のそれぞれのモデル(B~H)と比較すると線形解析と非線形解析での波形、振動数、周期などが合っている。モデル2とモデル1の波形、振動数、周期は線形解析と非線形解析とも同様である。

*モデル(Model) 3

モデルAは単振動でモデル2、モデル3の初期変位量はモデル1に比べると約10倍であるが、波形、周期、振動数は同様である。

モデルBでは線形解析の第一周期と非線形解析の第一周期は0.069秒で同一であるが、第二、第三の周期が違うことにより変位に対する時間のずれが見られる。

モデルCはモデルBよりスパン(Span)が長くなっているが、ポスト(Post)とポスト(Post)との間隔は短くなって構造全体の剛性が強くなり、モデルBより振動数も低く周期は長い。モデルDはモデルCより振動数が低いが、線形解析と非線形解析の時間ずれが見られる。

モデルDの非線形解析は線形解析より振動数が高くなっている。モデルEはモデルDより振動数が低くなっている。線形解析と非線形解析との時間のずれは大きいところで0.009秒であり、振動数、波形、周期はほぼ合っている。

モデルFはスパン(Span)とスパン(Span)との間が同一スパン(Span)のモデルより狭いのでモデルD、モデルEより剛性が高いので振動数が大きい。

モデルGでは線形解析と非線形解析との時間ずれの差が最も大きい、しかし微小振動であるモデル1では

波形、振動数は違うが周期は線形解析、非線形解析はほぼ合っていると言える。

モデルHの非線形解析では線形解析より振動数が多くなり線形解析との波形も合っていない。

4. 初期条件が振動に与える影響

4.1 初期変位量の影響

複合ケーブル構造における初期変位量の影響を把握するため解析モデルにおいて、その中心点の初期変位量を、スパン(Span)比1/1000、1/500、1/100と変化させ振動解析を行う。解析結果より、複合ケーブル構造では、中心点の初期変位量が大きいほど非線形性が強く現れる。

本解析モデルでは中心点の初期変位量がスパン(Span)に対して1/100程度で、線形解析(モード解析、シミュレーション線形解析)と非線形解析(シミュレーション非線形解析)の違いが現れる。すなわち、本モデルのような複合ケーブルでは初期変位(振幅)がスパン(Span)比1/100では、解析結果の工学的信頼性を得るためには非線形解析が必要であるといえる。

線形解析では振動数及び周期は初期変位量に関係なく等しい、振幅のみが変化するということである。これは、線形解析では、剛性マトリックス(Matrix)を初期つりあい状態で作成し、初期変位量に関係なく同一マトリックス(Matrix)で解析を行い、重ね合わせ原理を用いているためである。

非線形解析では、初期変位量が大きくなるほど振動数は線形解析に比べると多少低くなり、また振幅は小さくなる。これは非線形解析では複合ケーブル構造の幾何学的非線形性を考慮しているため、初期変位量が大きくなるのにもない復元力の非線形性は弱くなるためと考えられる。

4.2 初期張力の影響

複合ケーブル構造とは、構造物全体としての剛性を、部材の初期張力に頼る構造である。従って、初期張力が大きいほど剛性が大きくなるわけである。

このため、複合ケーブル構造における初期張力の影響を把握するため、解析モデル1-D、解析モデル2-D、解析モデル3-D、解析モデル1-G、解析モデル2-G、解析モデル

ル3-Gにおいて、その中心点の初期変位量をスパン(Span)比1/1000、1/500、1/100として振動解析を行う。解析結果より、初期張力が大きいほど、振動数は高く、周期は短くなる傾向にある。線形解析と非線形の解析の差は剛性が低い場合が多少あるが、本構造は剛性が高くしてそれほど大きな差が見られない。

4.3 ポスト(Post)間隔の影響

複合ケーブル構造とは、構造物全体としての剛性を、部材の初期張力に頼る構造であるが、初期張力の導入方法が同一であればスパン(Span)との間隔が短いほうが剛性が大きくなるわけである。

複合ケーブル構造におけるポスト間隔の影響を把握するため、解析モデル1-C、解析モデル2-C、解析モデル3-C、解析モデル1-D、解析モデル2-D、解析モデル3-D、解析モデル1-F、解析モデル2-F、解析モデル3-Fの中心点の初期変位量をスパン(Span)比1/1000、1/500、1/100として振動解析を行う。解析結果より、スパン(Span)との間隔が短いほうが剛性が高くなることにより振動数も高く、周期は短くなっている。スパン(Span)比が小さいところ(モデル1-D)で線形性がスパン(Span)比が大きい(モデル3-D)ところより強く現れている。

4.4 ポスト(Span)長さの影響

複合ケーブル構造は、構造物全体の剛性を入れる方法として、境界条件によるダイアゴナルケーブル(Diagonal Cable)とリッジケーブル(Ridge Cable)を引張り出すことによって全部材に初期張力が入る。

しかし、導入方法が同一である場合には、ポスト(Post)の長さが長いところ(解析モデルH、解析モデルDより全ポスト長さ1m長い)のダイアゴナルケーブル(Diagonal Cable)の張力、すなわちケーブル(Cable)の剛性が大きくなっている。

複合ケーブル構造におけるポスト(Post)の長さの影響を把握するため、解析モデル1-D、解析モデル2-D、解析モデル3-D、解析モデル1-H、解析モデル2-H、解析モデル3-Hを用いる。その中心点の初期変位量をスパン(Span)比1/1000、1/500、1/100として振動解析を行う。応力解析結果より、スパン(Span)の長さが長いほうがリッジケーブル(Ridge Cable)剛性が高くなる。

そこで、振動解析を行うと線形解析では微小振動と大振幅の振動ではほぼ同じ波形を示している。微小振動では線形解析と非線形解析の振幅の差が見られるが、大振幅の振動では微小振動のような振幅の差が見られない。

5. まとめ

1. 微小、大振幅振動動解析ではモード(Mode)解析と線形シミュレーション(Simulation)解析の解析結果は完全に一致している。非線形ニューマーク(Newmark)の β 法解析も微小振動ではそれらとほぼ同様な結果が得られているが、大振幅振動では波形、周期のずれが多少現れている。
2. 初期張力が強いほど構造全体の剛性が高くなり、振動数が高くなる。微小振動では初期張力が強いと振動は安定し同じ波形の繰り返しとなるが、大振幅振動では波形、周期が線形解析と非線形解析でずれが生じるとともに不安定になる。
3. ポスト(Post)の長さが長くなるほど、振動数が高く、周期は短くなる。振幅はそれほど大きな変化が見られない。
4. ポスト(Post)との間隔が短くなるほど、振動数が高く、周期は短くなる。振幅はそれほど大きな変化が見られない。
5. ライズ(Rise)比が低くなるほど、振動数が低く、周期は長くなる。振幅はそれほど大きな変化が見られない。
6. 微小振動、大振幅振動では、波形は初期形態(初期張力を含む)により決定し、初期変位の差はそのままの振幅の違いとなる傾向が見られる。
7. 初期変位量(振幅)が大きいほど振動の線形解析と非線形解析とのずれが現れている。特に複合ケーブル構造においては、初期変位量がスパン(Span)比1/100程度ではスパン(Span)比1/1000である微小振動より解析の違いが見られである。複合ケーブル構造は雪荷重に対しては 60kg/m^2 までが有効であり、

