

複合ケーブル構造によるスタンド屋根構造

～その可能性と基本特性について～

大 矢 賢 史*1

概 概

ケーブル構造の一種である複合ケーブル構造は、これまでドーム構造には採用されてきたが、競技場等のスタンド屋根構造においてはまだ例がない。本研究では、複合ケーブル構造によるスタンド屋根構造について、主にその構造面からのアプローチを試みる。基本モデルを設定し、その静的解析を通じて、構造成立に最低限必要な各部材の初期張力値および断面積を決定する。加えて、各荷重載荷時の変化によって明らかになった基本的な特性から、複合ケーブル構造によるスタンド屋根構造の可能性を検討する。

1. はじめに

ケーブル構造はスポーツ施設・展示場・多目的ホールを形づくる重要な構造要素として、広範囲の建築物に用いられるようになってきている。その構造は張力を導入されたケーブルの剛性を期待して成立している。

「複合ケーブル構造」とは、ケーブル構造の一種であり、引張力のみを負担するケーブル材および膜材と圧縮力のみを負担する棒材（束材、ポスト）から形成されている構造で、その軽量性、経済性等が他の構造に比べて優れていることから、近年の大空間構造に用いられはじめている。建設例としては、ソウル・オリンピックの体操競技場[1986]、フロリダ・サンコースト・ドーム[1990]、ジョージア・ドーム（テンセグリティ構造）[1992]等が挙げられる。

観客席（スタンド）上部の大屋根は、ローマ時代のコロシウムにも使われており、その後構造法には種々のものが考えられている。スタンド屋根構造は、膜構造やケーブル構造の特性を活かすことのできる分野の一つであり、国内外に広く応用されている。ケーブル構造を用いたスタンド屋根構造の例としては、ミュンヘン・オリンピックスタジアム[1972]、ローマ・オリンピックスタジアム[1990]等が挙げられる。

このように、これまで複合ケーブル構造を用いた建

設例としてはドーム構造（ケーブルドーム）は各種見られるが、競技場等のスタンド屋根構造に代表される中央部を開放した形状のものは例がない。複合ケーブル構造によるスタンド屋根構造が可能であれば、複合ケーブル構造によるドーム構造と同様に、従来のスタンド屋根構造と比較しても、優れた特性が期待できる。

本研究では、この構造について、基本モデルの静的解析から、実際の計画時の資料となるように、その構造成立に最低限必要である各部材の初期張力値および断面積を決定していく。また、その解析結果をふまえて基本的な構造特性を把握し、複合ケーブル構造によるスタンド屋根構造の可能性について検討する。

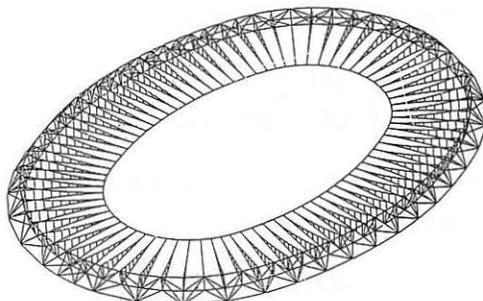


図1 ローマ・オリンピックスタジアム屋根架構図
(出典：Architectural Record, August, 1993)

*1 横浜国立大学 大学院

2. 解析理論の概要

本研究の解析には、有限要素法によった線材解析のプログラムを用いている。材料線形、形態非線形（幾何学的非線形）とし、ニュートン・ラフソン法を用いて収束計算させている。

幾何学的非線形解析理論の概要を以下に示す。

変位が有限個のパラメータ $\{\delta\}$ によって規定されるとすると、内外力の釣り合い条件式は、

$$\{\psi(\{\delta\})\} = \int_V [B]^T \{\sigma\} dV - \{R\} = 0 \quad (1)$$

$\{\psi\}$: 外部および内部一般化力の総和
 $\{\sigma\}$: 応力ベクトル
 $\{R\}$: 外力ベクトル

と表わされる。 $[B]$ はひずみの定義から、

$$d\{\varepsilon\} = [B] d\{\delta\} \quad (2)$$

$$[B] = [B_0] + [B_L] \{\delta\} \quad (3)$$

となる。 $[B_0]$ 、 $[B_L]$ はそれぞれ $[B]$ の線形部、非線形部であり、 $[B_L]$ は $\{\delta\}$ の関数になっている。

ニュートン・ラフソン法を用いる場合には、 $d\{\delta\}$ と $d\{\psi\}$ の関係が必要となる。したがって、 $d\{\delta\}$ について式(1)の変分をとると、

$$d\{\psi\} = \int_V d[B]^T \{\sigma\} dV + \int_V [B]^T d\{\sigma\} dV \quad (4)$$

を得る。式(2)と一般的な弾性関係との関係から、

$$d\{\sigma\} = [D] d\{\varepsilon\} = [D][B] d\{\delta\} \quad (5)$$

となり、したがって、

$$d\{\psi\} = \int_V d[B_L]^T \{\sigma\} dV + [K] d\{\delta\} \quad (6)$$

が得られる。なお、式(6)において、

$$[K] = \int_V [B]^T [D][B] dV \quad (7)$$

$$\int_V d[B_L]^T \{\sigma\} dV = [K_\sigma] d\{\delta\} \quad (8)$$

であり、 $[K_\sigma]$ は応力レベルに依存する幾何剛性マトリックスである。したがって、

$$d\{\psi\} = ([K] + [K_\sigma]) d\{\delta\} \quad (9)$$

となり、これを解くことにより解を得ることができる。

3. 解析にあたって

3.1 モデルの設定

複合ケーブル構造は、その部材配置によって数種類に分けられるが、今回は Geiger タイプを用いている。

モデルの設定に際しては、実在する野球場を基準にした。この野球場は、グラウンド部分が半径約 69m の、スタンドを含めた全体が半径約 92m の真円をもつ平面形状となっている。図 2 はその平面図である。基本モデルには、これら 2 つの円を同心にした対称平面形状を適用することにした。

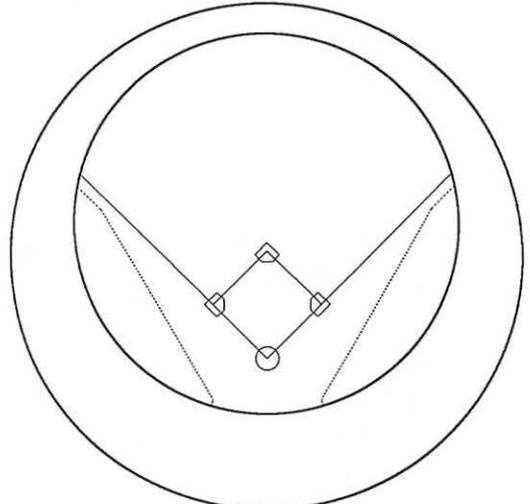


図2 野球場平面図

屋根面分割数を 24、ライズ・スパン比を 1/10 で設定する。この値は後述のすべてのモデルおよびパターンに共通している。

屋根面分割線には、引張材のリッジ・ケーブル、ダイアゴナル・ケーブルと圧縮材のポストから構成される Geiger タイプの基本ユニットが配置される。基本ユニット図を図 3 に示す。

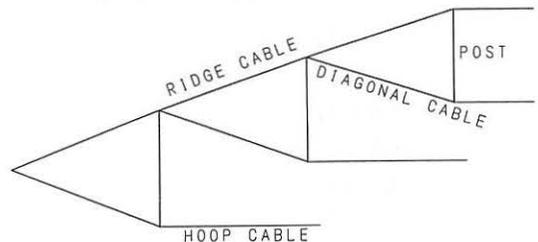


図3 基本ユニット図

ポスト数は 3 本および 2 本とし、平面上の屋根部を三等分および二等分する円周上および内円上にポストを配置する。

屋根全体の構成は、各ユニットの同円周上のポスト

下端（内円上のみポスト両端）をフープ・ケーブルによって結合することで成り立っている。

ポスト数 3 本のを「モデル 1」、2 本のを「モデル 2」とする。図 4 にモデル 1 の平面図を示す。

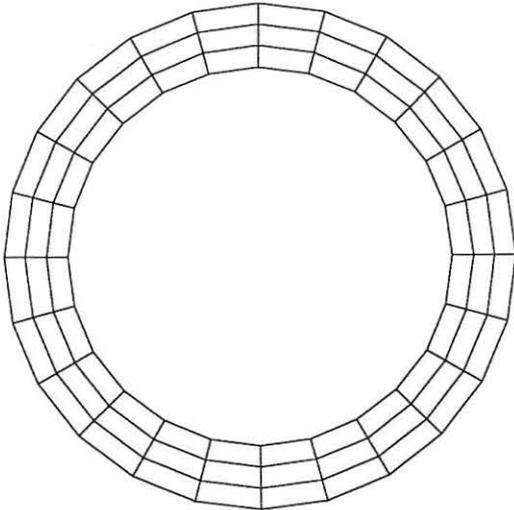


図 4 モデル 1 平面図

ポスト上端は常にライズ曲線（円弧）上に設定することとした。（図 5）

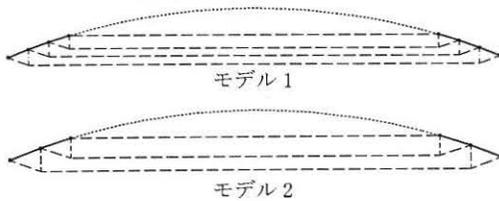
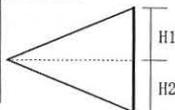


図 5 ライズ曲線上のポスト上端位置

2 つのモデルについては、ポスト上端からの水平線によるポスト分割比によってポスト長を変えることで、計 8 種類のパターンをもたせた。表 1 にそれぞれのモデル名、分割比、設定ポスト長を示す。

表 1 分割比とポスト長の設定

モデル名	H1 : H2	ポスト長(m)		
model-1A	1:1	6.08	5.48	4.90
-1B	1:1.5	7.60	6.85	6.13
-1C	1:2	9.12	8.22	7.36
-1D	1:2.5	10.64	9.59	8.58
model-2A	1:1	8.89	7.57	
-2B	1:1.5	11.12	9.46	
-2C	1:2	13.34	11.35	
-2D	1:2.5	15.57	13.25	



これまでの設定によるモデル全体の形状を、分割比 1:1 のポストをもつモデル-1A、モデル-2A を例にとって、図 6 に示す。

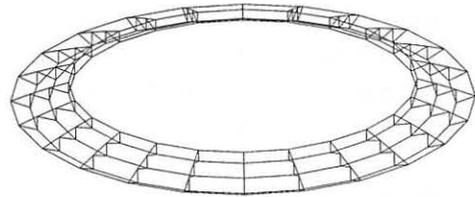


図 6.1 モデル-1A

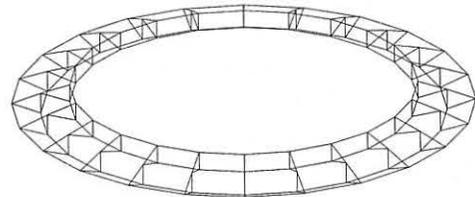


図 6.2 モデル-2A

3.2 材料の設定

使用材料は以下のように設定した。

引張材

材料名：構造用スパイラルロープ

種別：ST 1570

弾性係数：1,600,000 kg/cm²

単位重量：0.827 kg/m・cm²

圧縮材

材料名：一般構造用炭素鋼鋼管

弾性係数：2,100,000 kg/cm²

単位重量：0.78 kg/m・cm²

3.3 解析荷重の設定

3.3.1 固定荷重

上述の引張材自重および圧縮材自重に加えて、取付金物等を考慮した膜自重として 3.0kg/m²を設定した。以後、これらをまとめて「自重」と呼ぶことにする。

3.3.2 風荷重

設計用速度圧を $q = 120\sqrt{h}$ 、風力係数を全面吹上げで $C = -1.0$ と設定した。また、偏風荷重についても解析をおこなった。設定等は後述にあるとおりである。

3.3.3 積雪荷重

積雪モードとして全面等分布状態を設定し、一般地域用に 60kg/m²、多雪地域用に 450kg/m² の 2 種類を短期荷重として設定した。

3.4 解析上の仮定

1. 設定モデルはいずれも同ユニットの対称配列となっているため、図5における実線部と破線部からなる平面モデルによって解析をおこなった。両ユニットをつなぐ部材を仮想フープ・ケーブルとして解析し、実際には立体モデルにおけるフープ・ケーブルについての数値が必要となることから、平面から立体への値の換算を施した。これについては、ユニットとフープ・ケーブルのなす角度を用いて簡単に換算でき、まったく問題ないことが確認されている。
2. 図7のように、実際の Geiger タイプのユニットでは、ポスト下端からポスト上端につながるダイアゴナル・ケーブルとそこから外部構造体につながるリッジ・ケーブルは1本の連続したケーブルとなっており、ポスト上端部ではケーブルが架構方向に自由に滑る「滑り交点」を有することになる。そのため、解析では、ポスト上端部におけるケーブルの滑りの考慮が必要となるが、一方ではより簡便な方法が要求される。その1つの方法として、ポスト上端部の「滑り交点」を固定交点とみなす方法が考えられ、本研究の解析にもこの方法を用いている。

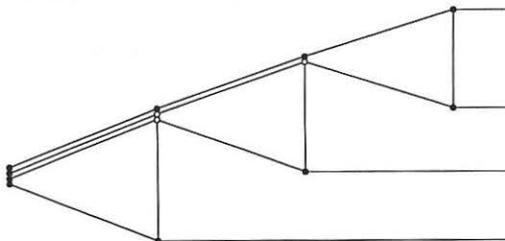


図7 滑り交点をもつユニット概念図

3. 図7にあるように、実際には複数本のケーブルからなる部分がある。解析上は、これらの各断面積を併せて1本の部材とした。張力は断面積比によって各ケーブルに分配している。
4. 膜材自体は考慮していない。膜自重および膜材にかかる荷重については、節点荷重としてポスト上端部に振り分けた。
5. ケーブル材の断面積は、解析結果から判断した任意の値であり、規格には適合していない。圧縮材のそれは、許容圧縮力の評価が必要なため、規格によっている。
6. 最低限必要な値の決定には、ケーブル材のリンクリング時等における、不足初期張力量を知ることが不可欠である。そのため、ケーブル材を抗圧縮材と仮定し、リンクリング時には圧縮力を発生させた。

4. 必要初期張力値および断面積の決定

4.1 決定までの流れ

複合ケーブル構造を含めて、一般に、ケーブル構造においては、ケーブル材に初期張力を導入することでその剛性を確保しているが、その導入量は自己釣合応力系を満足するものでなくてはならない。そこで、各部材の「自己釣合応力係数」を算出し、その値に基準値を乗ずることによって、自己釣合応力系を満足する初期張力値を算出する。さらに、荷重載荷による発生応力にもとづいた基準値の調節によって、設計上最低限必要な各部材の初期張力値および断面積を決定する。基準値の調節にあたっては、「ケーブルには引張、ポストには圧縮」という複合ケーブル構造の機能性と各部材の許容応力値を考慮した。

決定までの流れを以下に示す。

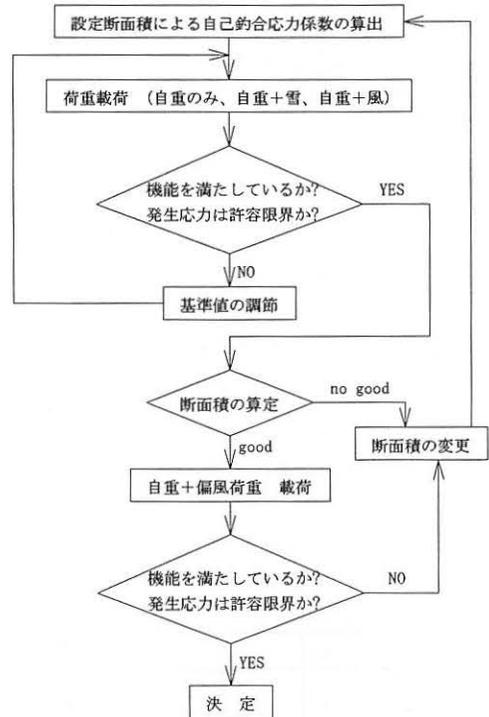


図8 決定までの流れ

4.2 自己釣合応力係数の算出について

自重を考慮しないモデルでの、初期張力 1kg による解析結果の発生応力を「自己釣合応力係数」とした。これは基準値に対する自己釣合状態の張力分布であり、この値によって決定される初期張力値は自己釣合応力系を満足することが確認されている。この方法を用いたため、「基準値」という設定が必要となった。

4.3 算定上の設定

4.3.1 破断荷重

ケーブル断面積の算定には、破断荷重が必要である。今回は任意の断面積を用いているため、破断荷重 F_b は式(10)を用いて算出した。

$$F_b = A \times \sigma_b \quad (10)$$

A : 断面積 (任意)

σ_b : 公称引張強さ

なお、構造用スパイラル・ロープ(ST 1570)の公称引張強さは、16,000kg/cm²となっている。

4.3.2 許容引張力

長期許容引張力は破断荷重の1/3とし、短期許容引張力は長期許容引張力に1.35を乗じた値とした。

4.3.3 許容圧縮力

ポストには鋼管を用いているため、長期許容圧縮力は、それぞれの径、厚、長さ等から随時計算し、短期許容圧縮力は、長期許容圧縮力に1.5を乗じた値とした。

4.4 その他の設定

偏風荷重の風力係数の設定は以下のとおりである。屋根面の分割に沿った設定で、モデル1、モデル2に共通である。

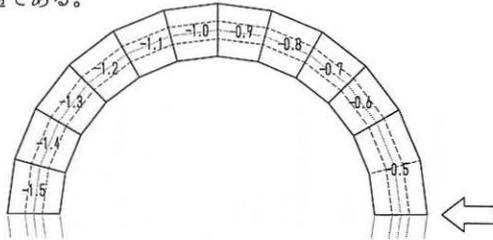


図9 偏風荷重時の風力係数

モデル1、モデル2における部材名称は以下のように設定する。

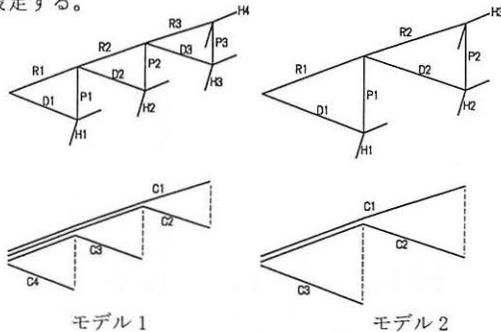


図10 各モデルの部材名称

また、解析プログラムの都合上、リッジ・ケーブルとダイアゴナル・ケーブルは、必要初期張力値の決定については単独部材 (R1,D1 etc.) として、必要断面積の決定については一体化した部材 (C1,C2 etc.) として扱った。(図10参照)

4.5 決定

必要初期張力の決定要因となった荷重は、モデル1A、1B、2A(一般)、モデル1A、1B、1C、1D、2A、2B、2C(多雪)が「自重+積雪荷重」(以後「雪」)、モデル1C、1D、2B、2C、2D(一般)、モデル2D(多雪)が「自重+風荷重」(以後「風」)であった。また、決定における判断部材は、「雪」によって決定される場合には、R3およびH4(モデル1)、R2およびH3(モデル2)、「風」によって決定される場合にはP1(モデル1、モデル2)であった。前者においては上記部材のリンクリング直前が、後者においては機能性損失(ポストの圧縮力消失)直前が基準となった。

必要断面積の決定要因荷重は、その部材によって異なった。一般地域モデルでは、ほとんどの部材が「自重のみ」や「自重+偏風荷重」によって決定され、特に内側に存在する部材が「風」に支配された。多雪地域モデルではあらゆる荷重によって決定され、特に、外側に存在する部材が「雪」に支配された。また、ユニットのケーブル(C1,C2 etc.)断面積の決定は一体部材としておこなったが、「固定交点」解析上、その構成部材(モデル1AのC2ケーブルではR1,R2,D3)によって発生張力は異なるため、それぞれを比較した上での決定が必要となった。今回は、ユニットの各ケーブルとも、単独でリッジ・ケーブルあるいはダイアゴナル・ケーブルとなる構成部材(モデル1ではR3,D3)の発生張力によって決定された。

関連図表を以降に示す。

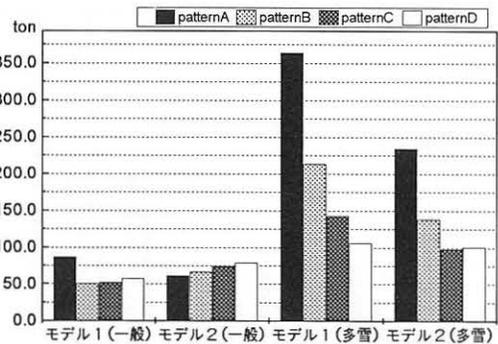


図11 各モデルの決定基準値

表2 各モデル(一般地域)の基準値と自己釣合応力係数

	model-1A	model-1B	model-1C	model-1D
基準値	87,100kg	50,750kg	52,000kg	58,000kg
P1	-0.6218	-0.7970	-0.9516	-1.0510
P2	-0.2802	-0.4310	-0.5718	-0.6766
P3	-0.1254	-0.2314	-0.3411	-0.4325
R1	1.6869	2.1622	2.5817	2.8512
R2	0.8326	1.2807	1.6991	2.0105
R3	0.4116	0.7597	1.1199	1.4198
D1	1.6869	1.5591	1.5315	1.4928
D2	0.8326	0.9122	0.9833	1.0155
D3	0.4116	0.5350	0.6331	0.6926
H1	6.0069	5.1330	4.5967	4.0612
H2	3.0034	3.0798	3.0645	2.9009
H3	1.5017	1.8479	2.0430	2.0721
H4	1.5017	2.7718	4.0859	5.1801

	model-2A	model-2B	model-2C	model-2D
基準値	61,000kg	65,100kg	74,300kg	78,800kg
P1	-0.4810	-0.6487	-0.7438	-0.7893
P2	-0.2047	-0.3313	-0.4220	-0.4798
R1	1.3335	1.7986	2.0622	2.1833
R2	0.6547	1.0596	1.3499	1.5348
D1	1.3335	1.2929	1.2158	1.1355
D2	0.6547	0.7483	0.7676	0.7551
H1	4.7644	4.2840	3.6839	3.1273
H2	2.3822	2.5704	2.4559	2.2338
H3	2.3822	3.8556	4.9119	5.5844

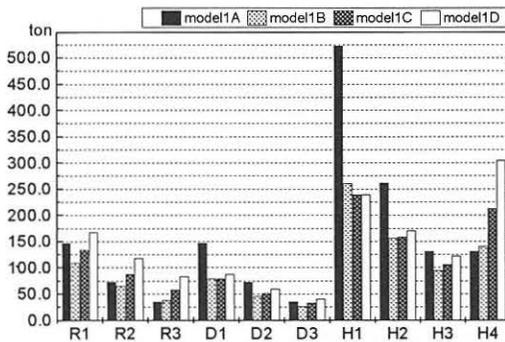


図12 モデル1(一般地域)の必要初期張力値

表3 各モデル(多雪地域)の基準値と自己釣合応力係数

	model-1A	model-1B	model-1C	model-1D
基準値	364,200kg	214,000kg	143,300kg	106,200kg
P1	-0.7274	-0.8760	-0.9783	-1.0342
P2	-0.3278	-0.4737	-0.5879	-0.6658
P3	-0.1467	-0.2543	-0.3507	-0.4256
R1	1.9734	2.3764	2.6541	2.8058
R2	0.9740	1.4076	1.7467	1.9785
R3	0.4815	0.8350	1.1513	1.3972
D1	1.9734	1.7136	1.5745	1.4691
D2	0.9740	1.0026	1.0109	0.9994
D3	0.4815	0.5880	0.6509	0.6815
H1	7.0271	5.6415	4.7256	3.9966
H2	3.5135	3.3849	3.1504	2.8547
H3	1.7568	2.0310	2.1003	2.0391
H4	1.7568	3.0464	4.2005	5.0976

	model-2A	model-2B	model-2C	model-2D
基準値	235,100kg	138,500kg	98,400kg	100,500kg
P1	-0.5496	-0.6625	-0.7273	-0.7574
P2	-0.2339	-0.3383	-0.4126	-0.4604
R1	1.5238	1.8367	2.0164	2.0998
R2	0.7481	1.0821	1.3199	1.4727
D1	1.5238	1.3203	1.1888	1.0896
D2	0.7481	0.7642	0.7505	0.7246
H1	5.4442	4.3749	3.6021	3.0009
H2	2.7221	2.6249	2.4014	2.1435
H3	2.7221	3.9374	4.8028	5.3587

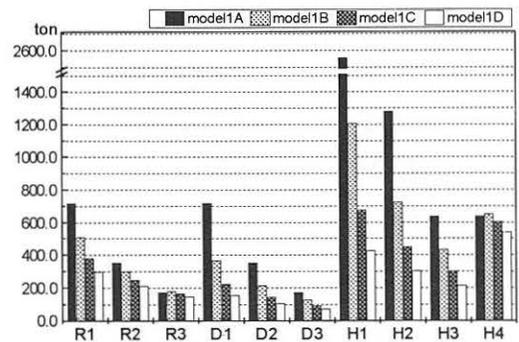


図14 モデル1(多雪地域)の必要初期張力値

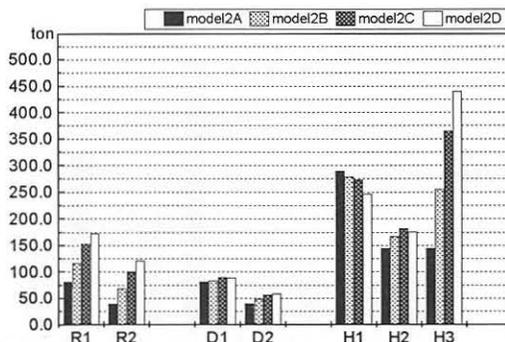


図13 モデル2(一般地域)の必要初期張力値

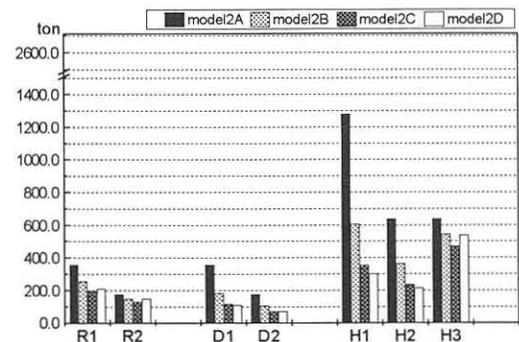


図15 モデル2(多雪地域)の必要初期張力値

表4 各モデル(一般地域)の必要断面積(cm²)

	model-1A	model-1B	model-1C	model-1D
P1	52.35	52.35	65.19	87.36
P2	30.01	34.82	46.03	57.27
P3	25.22	34.79	40.40	46.03
C1	20.00	24.00	26.50	30.00
C2	14.00	12.50	11.50	12.00
C3	14.00	9.50	11.50	13.50
C4	28.50	16.00	18.00	20.00
H1	101.51	53.63	53.63	55.54
H2	49.80	32.56	36.39	40.22
H3	49.80	42.14	38.31	34.48
H4	78.53	91.94	101.51	113.00

	model-2A	model-2B	model-2C	model-2D
P1	46.03	68.50	87.36	112.36
P2	34.82	46.03	57.27	68.50
C1	24.50	28.00	31.00	33.00
C2	14.50	13.00	12.50	13.50
C3	16.00	19.00	20.50	20.50
H1	57.46	63.21	63.21	57.46
H2	51.71	45.97	40.22	40.22
H3	95.77	109.17	118.75	126.41

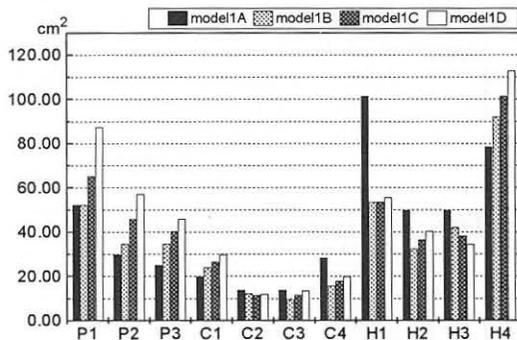


図16 モデル1(一般地域)の必要断面積

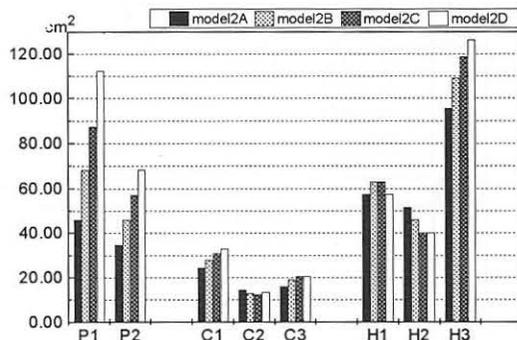


図17 モデル2(一般地域)の必要断面積

表5 各モデル(多雪地域)の必要断面積(cm²)

	model-1A	model-1B	model-1C	model-1D
P1	186.99	167.84	148.68	148.68
P2	87.51	87.51	87.51	87.51
P3	46.03	57.27	57.27	57.27
C1	37.00	40.00	37.50	34.50
C2	33.50	25.50	19.50	15.50
C3	67.00	42.50	30.00	26.00
C4	140.00	80.00	60.00	50.00
H1	499.90	264.31	180.04	137.90
H2	241.33	143.65	95.77	74.70
H3	122.58	88.10	63.21	47.88
H4	134.07	149.40	139.82	130.24

	model-2A	model-2B	model-2C	model-2D
P1	126.73	148.68	148.68	167.83
P2	57.27	65.19	68.50	69.13
C1	39.00	35.00	32.50	34.00
C2	35.50	22.50	16.00	15.00
C3	81.00	55.50	44.00	41.50
H1	289.21	183.87	134.07	114.92
H2	130.24	78.53	51.71	45.97
H3	145.56	132.16	124.50	130.24

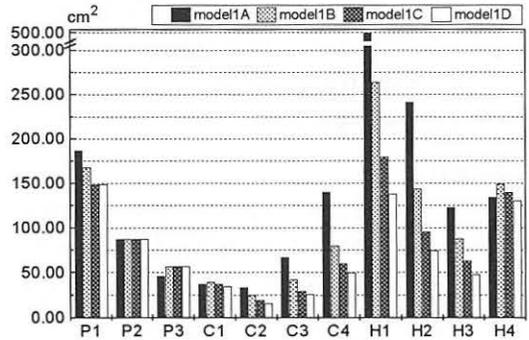


図18 モデル1(多雪地域)の必要断面積

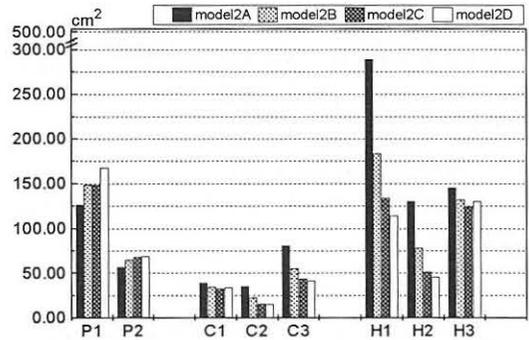


図19 モデル2(多雪地域)の必要断面積

これまでの値から、特にフープ・ケーブルの断面積や初期張力値が構造全体の剛性に大きく影響していることがわかる。必要初期張力値の決定要因荷重は、すなわち、そのモデルが弱い方向の荷重ということであ

り、その影響もフープ・ケーブルに出ている。また、外側に位置する部材は鉛直下向き荷重が、内側に位置する部材は鉛直上向き荷重が大きく作用していることもわかる。

5. 荷重载荷による変化

ここでは、必要値決定時の各荷重载荷による発生応力および変位について簡単に述べていく。偏風荷重载荷による変化については5.3でまとめて触れる。

5.1 発生応力

発生応力については、(表2、表3: 基準値×自己釣合応力係数) 必要初期(張力)値に対しての増減を割合で示すこととした。表6~表9に「自重+積雪荷重」(以後「雪」, F+S)、「自重+風荷重」(以後「風」, F+W) 載荷時の各モデル、各部材についての値を示す。「自重のみ」については省略した。引張力、圧縮力ともに、増加は+、減少は-である。

ポスト分割比の増加に対しては、

- ・多くの部材の増減割合値が、「雪」では増加傾向に、「風」では減少傾向にある。
- ・各部材の機能性損失(表の値では-1.0)は「風」の影響が大きくなっている。特に、モデル1(多雪地域)では「雪」が機能性損失に影響するのに対して、モデル2(多雪地域)では、多雪にもかかわらず、「風」が機能性損失に強く影響している。

という点特徴的である。

5.2 変位

変位については、最内部ポストの鉛直方向変位が全体で最大となっているため、その最大値についてのみ触れることにする。各モデルおよび各荷重载荷における最大変位量を表10に示す。

全体的に妥当な量である。自重による変位は、どのモデルも10cm以下であり、設計時に考慮する以外には特に問題はない。

多雪地域モデルは、全体の傾向として必要初期張力値が一般地域モデルより大きい。この効果が「自重+風荷重」載荷時の変位量に表れている。ただし「自重のみ」載荷時には効果は表れないようである。

ポスト分割比の増加につれて変位が抑えられている点特徴的である。

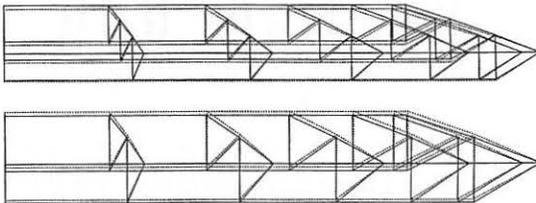


図20 変形例

[上: model-1B(多雪)F+S 下: model-2B(一般)F+W]

表6 モデル1(一般地域)における応力増減割合

F+S	model-1A	model-1B	model-1C	model-1D
P1	0.1534	0.2407	0.2653	0.2603
P2	-0.0208	0.0050	0.0667	0.0950
P3	-0.4620	-0.4754	-0.2767	-0.1578
R1	-0.3532	-0.4482	-0.3035	-0.2031
R2	-0.6934	-0.7611	-0.4969	-0.3292
R3	-0.9982	-0.9968	-0.6283	-0.4091
D1	0.1522	0.2419	0.2749	0.2745
D2	-0.0144	0.0174	0.0813	0.1111
D3	-0.3925	-0.4126	-0.2377	-0.1314
H1	0.1515	0.2409	0.2739	0.2737
H2	-0.0149	0.0168	0.0806	0.1104
H3	-0.3928	-0.4129	-0.2380	-0.1317
H4	-0.9992	-0.9975	-0.6287	-0.4093
F+W				
P1	-0.5964	-0.8735	-0.9986	-0.9986
P2	0.0220	0.0241	-0.2013	-0.3383
P3	1.4331	1.6949	1.0494	0.6159
R1	1.0422	1.3514	0.8646	0.5124
R2	2.1086	2.3966	1.5428	0.9731
R3	2.9721	3.1264	1.9805	1.2590
D1	-0.4901	-0.8264	-0.9690	-0.9721
D2	0.1860	0.1237	-0.1366	-0.2932
D3	1.6071	1.8158	1.1235	0.6622
H1	-0.4879	-0.8248	-0.9681	-0.9713
H2	0.1888	0.1265	-0.1340	-0.2912
H3	1.6093	1.8186	1.1259	0.6642
H4	3.1514	3.2951	2.0924	1.3373

表7 モデル1(多雪地域)における応力増減割合

F+S	model-1A	model-1B	model-1C	model-1D
P1	0.3744	0.6008	0.9118	1.2762
P2	0.1844	0.2910	0.4769	0.7039
P3	-0.3483	-0.3558	-0.3054	-0.2309
R1	-0.2822	-0.3399	-0.3544	-0.3497
R2	-0.6718	-0.7300	-0.7534	-0.7632
R3	-0.9943	-0.9957	-0.9959	-0.9958
D1	0.3172	0.5525	0.8716	1.2448
D2	0.1057	0.2391	0.4330	0.6687
D3	-0.3642	-0.3537	-0.3010	-0.2251
H1	0.3161	0.5507	0.8690	1.2415
H2	0.1045	0.2372	0.4303	0.6650
H3	-0.3650	-0.3547	-0.3022	-0.2266
H4	-0.9995	-0.9994	-0.9996	-0.9996
F+W				
P1	-0.2165	-0.3384	-0.5224	-0.7443
P2	-0.1169	-0.1478	-0.2372	-0.3635
P3	0.1489	0.2008	0.2040	0.1814
R1	0.1047	0.1337	0.1323	0.1121
R2	0.2881	0.3401	0.3643	0.3706
R3	0.4272	0.4767	0.5082	0.5262
D1	-0.1454	-0.2864	-0.4800	-0.7064
D2	-0.0286	-0.0884	-0.1911	-0.3244
D3	0.2288	0.2523	0.2450	0.2167
H1	-0.1448	-0.2855	-0.4791	-0.7056
H2	-0.0276	-0.0872	-0.1898	-0.3230
H3	0.2294	0.2532	0.2460	0.2180
H4	0.4638	0.5129	0.5476	0.5700

表8 モデル2(一般地域)における応力増減割合

F+S	model-2A	model-2B	model-2C	model-2D
P1	0.2339	0.2615	0.2538	0.2574
P2	-0.3081	-0.1034	-0.0247	0.0037
R1	-0.6160	-0.3314	-0.2051	-0.1608
R2	-0.9981	-0.5098	-0.3087	-0.2370
D1	0.2321	0.2770	0.2741	0.2811
D2	-0.2404	-0.0668	0.0008	0.0290
H1	0.2311	0.2760	0.2732	0.2802
H2	-0.2408	-0.0673	0.0003	0.0285
H3	-0.9992	-0.5103	-0.3089	-0.2371
F+W				
P1	-0.8219	-0.9984	-0.9992	-0.9996
P2	1.0441	0.4089	0.1200	0.0097
R1	1.9188	0.9690	0.5295	0.3658
R2	3.1424	1.6023	0.9338	0.6820
D1	-0.7418	-0.9573	-0.9651	-0.9670
D2	1.2102	0.4924	0.1713	0.0515
H1	-0.7401	-0.9564	-0.9644	-0.9663
H2	1.2125	0.4944	0.1730	0.0530
H3	3.3944	1.7482	1.0345	0.7658

表9 モデル2(多雪地域)における応力増減割合

F+S	model-2A	model-2B	model-2C	model-2D
P1	0.7020	1.1962	1.6850	1.6658
P2	-0.0502	0.1108	0.2792	0.3361
R1	-0.5274	-0.5456	-0.5575	-0.4439
R2	-0.9924	-0.9918	-0.9915	-0.7699
D1	0.6120	1.1310	1.6425	1.6524
D2	-0.0807	0.0921	0.2675	0.3337
H1	0.6097	1.1268	1.6365	1.6468
H2	-0.0821	0.0899	0.2647	0.3307
H3	-0.9994	-0.9993	-0.9995	-0.7753
F+W				
P1	-0.3948	-0.6861	-0.9936	-0.9990
P2	0.0379	-0.0146	-0.0972	-0.1489
R1	0.2339	0.2318	0.2100	0.1357
R2	0.4786	0.5133	0.5227	0.3967
D1	-0.3136	-0.6258	-0.9415	-0.9514
D2	0.1228	0.0454	-0.0500	-0.1123
H1	-0.3127	-0.6249	-0.9408	-0.9508
H2	0.1237	0.0466	-0.0488	-0.1111
H3	0.5356	0.5802	0.6001	0.4649

表10 最大鉛直方向変位量 (cm)

	一般地域モデル			多雪地域モデル		
	F	F+S60	F+W	F	F+S450	F+W
1A	-7.2	-26.4	+74.9	-8.0	-75.2	+31.9
1B	-6.3	-24.0	+71.2	-6.4	-68.7	+32.2
1C	-5.8	-20.5	+62.1	-5.6	-67.6	+33.6
1D	-5.3	-17.0	+50.9	-5.0	-65.0	+33.5
2A	-6.3	-24.4	+74.0	-6.4	-71.2	+34.6
2B	-5.3	-18.8	+58.4	-5.1	-66.7	+34.9
2C	-4.7	-15.1	+46.1	-4.4	-61.5	+33.0
2D	-4.4	-13.0	+38.5	-3.9	-51.6	+27.7

[F: 自重 S: 積雪荷重 W: 風荷重]

5.3 偏風荷重載荷による変化

偏風荷重の載荷においては、本来は風洞実験等によって得られた風力係数を設定することが望ましいが、今回の形状では見当がつかないため、図11のように便宜的に設定し、これをひとつの目安とした。

5.3.1 発生応力について

これまでにみられた引張力や圧縮力の消失という現象は、どのモデルについてもみられなかった。

これまでの一様分布荷重載荷時と比べて、どのモデルにおいても内側に存在する部材への影響が強く、断面積の算定に影響する部材もみられた。

最大張力発生部材は、モデル1ではH4、モデル2ではH3となっており、フープ・ケーブルの重要性がうかがえる。

5.3.2 変位について

表11に各モデルにおける最大鉛直方向変位量を示す。各ユニットの最大変位は最内部ポストに現れ、どのモデルも風上から離れるにしたがって鉛直上向きに変位が増大している。

また、一部のモデルについては、風上に近いユニットにおけるリッジ・ケーブルの曲率逆転現象がみられた。これは初期張力値および部材断面積の増加によって解消できることがわかっており、今回は確認のみに留めた。これまでの荷重載荷時には現れていない。

表11 偏風荷重載荷時の最大鉛直方向変位量 (m)

	一般地域モデル		多雪地域モデル	
	MAX(+)	MAX(-)	MAX(+)	MAX(-)
1A	2.231	-0.934	0.943	-0.326
1B	2.403	-1.259	1.181	-0.563
1C	2.334	-1.326	1.457	-0.820
1D	2.193	-1.352	1.716	-1.090
2A	2.461	-1.251	1.261	-0.588
2B	2.380	-1.402	1.695	-1.023
2C	2.219	-1.438	2.022	-1.403
2D	2.144	-1.480	1.988	-1.466

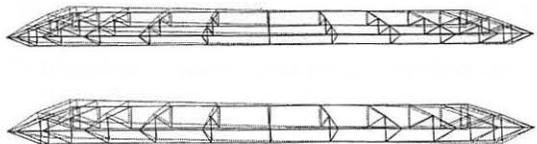


図21 変形例

[上: model-1A(一般) 下: model-2A(一般)]

6. まとめ

本研究を通じて、以下の点が明らかになった。

- ・「自己釣合応力係数」と「基準値」による初期張力の設定は有効であり、ある程度の任意形状については、この方法による初期張力を設定することで、安定形状を得ることができる。
- ・各モデルおよび各部材の必要値を見る限りでは、構造全体の剛性はフープ・ケーブルに大きく関係している。
- ・ポスト分割比が大きくなるにつれて、風荷重載荷時の発生応力割合は減少傾向が強くなり、特に機能性の面において、風荷重による影響が大きくなっている。ポスト数の少ないモデル2ではその傾向がさらに強い。
- ・ポスト分割比の増大につれて、変位量は減少傾向にあり、ポスト長と変位抑制に関連がみられる。

本研究は、計画時の基礎資料となるように、必要最低限の初期張力値および断面積に重点を置いた。決定された値は常識的な範囲であり、構造の可能性を示している。また、必要最低限の値ゆえ、各荷重載荷時にはかなり大きな変化が予想されたが、各静的荷重載荷時の変化を見る限りでは、その変化は許容範囲内であった。このことから、構造的に、複合ケーブル構造によるスタンド屋根構造は十分に可能であると言える。

屋根としての複合ケーブル構造を考えると、ポスト長が大きな問題点となってくる。今回の設定モデルに

おけるポスト長は最短のものでも約5mであり、ポストが視角的な障害物となる可能性がある。これを解決するには、ポスト長を短くするか、ユニットを支える外部構造体を高くするかに限られてくるが、大きな問題点としてはこの点ぐらいであり、従来のものに比べて、施工性や経済性および軽量性に優れたスタンド屋根構造となる可能性は大きいであろう。

参考文献

1. 日本建築学会編：「ケーブル構造設計指針・同解説」、日本建築学会、1994
2. O.C.Zienkiewicz 著、吉識雅夫・山田嘉昭 監訳：「マトリックス有限要素法」、培風館、1984、pp.495-498
3. 高重伯：「TENSION DOME の構造設計法」、横浜国立大学修士論文梗概集、1988
4. 半谷裕彦、真柄栄毅、岡村潔、林暁光：「複合ケーブル構造の構造安定性に関する研究—基本モデルの構造安定—」、膜構造研究論文集'88 -No.2-、日本膜構造協会、1988
5. 高重伯：「複合ケーブル構造の形態とその基本特性」、膜構造研究論文集'88 -No.2-、日本膜構造協会、1988
6. 高重伯、藤井淳一：「複合ケーブル構造の数値解析法に関する研究」、膜構造研究論文集'89 -No.3-、日本膜構造協会、1989

STUDY ON THE APPLICATION OF HYBRID-CABLE-STRUCTURE TO STAND-ROOF-STRUCTURE -ITS POSSIBILITY AND FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS-

Kenji OHYA*1

SYNOPSIS

HYBRID-CABLE-STRUCTURE, which is a kind of cable-structure, is constituted of cables, membranes, posts, etc.. It has been adopted in dome-structure, but it has never been adopted as a roof. In this paper, the possibility about using HYBRID-CABLE-STRUCTURE as stand-roof-structure is mainly investigated from the structural point of view. The value of prestress and section area of each bar element requisite for the construction is calculated through static analysis based on fundamental models. Besides, some fundamental characteristics are understood by studying the change of stresses and deformations considering dead loads acting on the models. As a result, we can conclude that it is possible to use HYBRID-CABLE-STRUCTURE in stand-roof-structure.

*1 Student of Master Course, Yokohama National University