

複合ケーブル構造の形態とその基本特性

— ケーブルレイアウトについて —

高 重 伯 *1

梗 概

MEDIUM級Tension Dome (SPAN100(m)程度)の設計において、各部材の必要初期張力は同一荷重条件においても、RISE比、屋根面分割数、POST数、POST長さ等によって、異なったものとなる。ここでは、一般的同一荷重条件で、これらの組み合わせによってどのような張力状態になるかを、幾何学的釣合形態より求め、あるCRITERIAを決めた場合、どのようなLAYOUTが好ましいかを検討したものである。

(1) 研究の目的

TENSION DOMEとはCABLEと束材(POST)によりDOMEを形成する新たな構造である。

MEDIUM級TENSION DOME (SPAN 100(m)程度)の設計施工においては、各CABLE材の初期張力の導入による張力分布状態、目標設計曲面形状と応力分布状態等について、知っておかねばならない。主構造材である各CABLEには、初期張力が導入され、さらに、積雪、風圧等による外力により、大きな引張応力が生じる。このときの張力がDOME全体でできるだけ均一になることが望ましいが、これを、設定する各形態ごとに張力比として表わし、張力状態を検証し、把握する必要がある。その張力分布状態に影響を与えているのは、SPANに対するRISEの変化、SPANに対するPOST数の変化、屋根面分割数の変化、DIAGONAL CABLEとPOSTの間の角度に変化を与えるPOST長さの変化等である。種々の形態における張力分布を、数値解析により把握する。特に、POSTの上下部で大きな引張応力が生じるので初期張力を導入する場合の施工性、さらに、本構造では再導入張力が必要であるが、これに対する施工性も、節点数に関しての検証が必要である。

又、このような応力に対する屋根全体のWIRE重量(DIAGONAL, RIDGE, RING CABLEなど)を比較することにより、構造物に対する経済検討が可能であるが、POST

数の変化、屋根面分割数の変化によって平面上のPOST節点数の数が変化するので、これによって施工する場合の経済評価の可能性を検討する。

(2) TENSION DOMEの主要材料

POST :本構造において空間を形成する材で唯一の圧縮材となる束材。

RIDGE CABLE :POST上部間を連結するWIRE。

DIAGONAL CABLE:POST上部とPOST下部を連結しているWIRE。

RING CABLE :POST下部間をDOMEの円周方向に連結するWIRE。

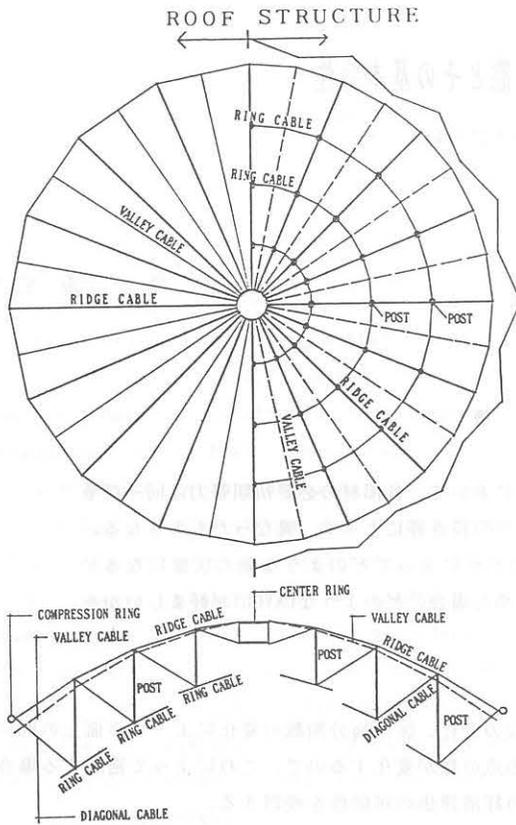
TENSION STEEL RING :DOMEの上部中央にあるRINGで、(CENTER RING)ここに換気設備を設置する。

VALLEY CABLE :主構造材のRIDGE CABLE間に張るCABLEで、膜材に張力を与える。

COMPRESSION RING :DOMEの外周部にあって、VALLEY CABLE、RIDGE CABLEや、DIAGONAL CABLEの引張力を支える。

建設例として、韓国 SEOULの OLYMPIC体操競技場と FENCING競技場があり、それぞれ収容人員は15,000人と7,000人で、SPANは120(m),93(m)である。また、U.S.A.の ILLINOIS州の CHICAGO と FLORIDA州の ST.PETER BURGにはSPANがそれぞれ90(m),200(m)のものがある。

*1横浜国立大学 工学部 計画建設学科 博士課程



CABLE DOMEの構成部材

(3) 張力の流れの基本的な考え方

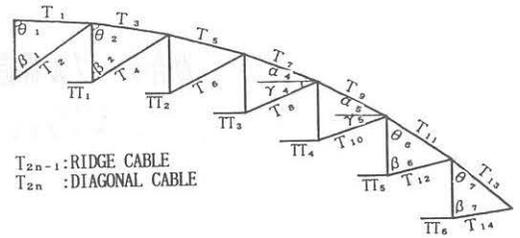
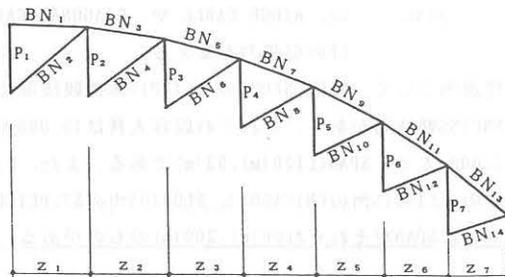
仮定形状に対し架構を安定させるために、付加荷重を与えて、RIDGE CABLE と DIAGONAL CABLE、RING CABLEの張力を幾何学的関係から水平、鉛直それぞれの成分について釣り合い条件を考え、中央上部から外側下部へと、各軸を設定する。

Z_N は同一ではない。 BN_{2N-1} は同一である。

$W(I)$: 雪荷重 $SW(I)$: 自重

$$I = 1$$

$$T(I) = W(I) + SW(I)$$



$$T(I+1) = \{W(I) + SW(I) + T(I) \cdot \cos \theta(I)\} / \cos \beta(I)$$

$$I = 2 \sim n - 1$$

$$T(2I+1) = \{T(2I-1) \cdot \cos \alpha(I) + T(2I) \cdot \cos \gamma(I) + SW(2I+1)\} / \cos \alpha(I+1)$$

$$T(2(I+1)) = \{(W(I) + W(I+1)) / 2 + SW(2(I+1)) + T(2I) \cdot \cos \beta(I) + T(2I+1) \cdot \cos \theta(I+1) - T(2I-1) \cdot \cos \theta(I)\} / \cos \beta(I+1)$$

$$T T(I) = T(2(I+1)) \cdot \cos \gamma(I+1)$$

このようにして得た張力を初期張力とすると、雪荷重を受ける場合の張力状態がある程度予測でき、屋根全体のWIREの重量が出て、ある程度までのWIREの重量比が比べられる。

(4) 幾何学的数値解析の概要

本解析は、新しい空間構造" TENSION DOME" の構造設計時の基礎資料を得るための幾何学的解析である。

解析の目的は、DESIGN的要求から設定されるSPANに対するRISE比(SLOPE)、及びPOST長さの変化、POST間隔の変化、屋根面分割数の変化によるCABLEの力学挙動の把握。さらにDIAGONAL CABLEとRIDGE CABLEの急激な張力変化が発生しないようなPARAMETERの把握である。またそこで発生する張力で部材断面を求めて重量を算定することにより経済性の検討が可能である。

その形状PARAMETERを次に示す。

SPANはMEDIUM級、雪荷重60kg/m²

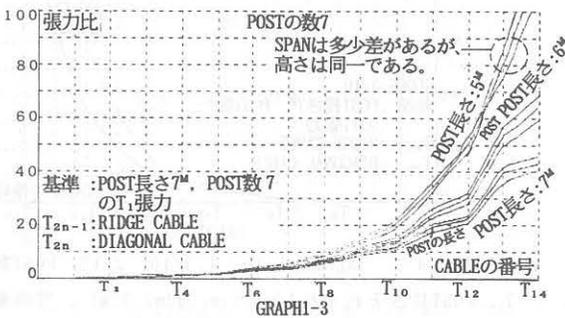
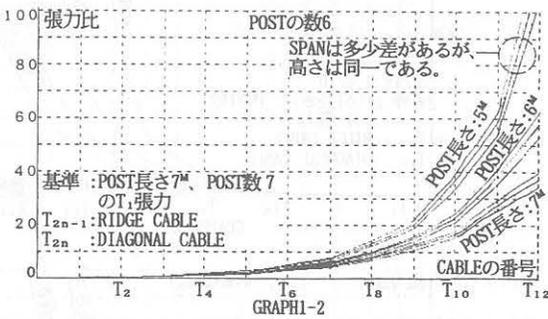
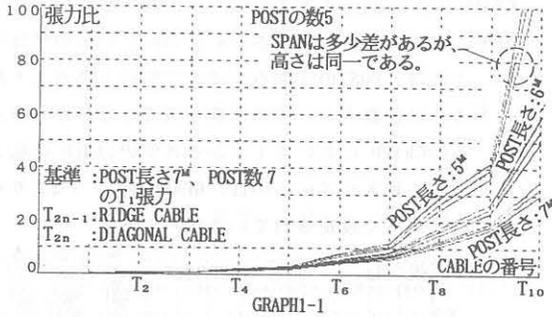
RISE比	1/10	1.5/10	2/10	
POST数	4	5	6	7
POST長さ	4(m)	5(m)	6(m)	7(m)
屋根面分割数	16	18	20	

上記のPARAMETERを組み合わせることで、種々の形状についての数値解析を行なう。

(4-1) 幾何学的な数値解析

MEDIUM級SPAN(100(m)程度)に適用することは次に示す通り可能である。SPANはMedium級0.9X(m), X(m), 1.1X(m) (ただし、X(m)はMEDIUM級SPANである)に対して屋根面分割数18、POSTの数4,5,6,7 POST長さが雪荷重60(kg/m²)をPARAMETERとして利用しているが、高

さはSPANに対するRISE比ではなくて同一な高さで計算を行なうと次の様になる。



張力比は、SPAN X (m), POST長さ7 (m), POST数7, SLOPE 1/10の第一RIDGE CABLE (T₁) の張力を基準に他のRIDGE, DIAGONAL CABLE の張力を割った比である。

GRAPH 1-1, GRAPH 1-2, GRAPH 1-3 は同一条件で POST数5, 6, 7 で変化させた場合の張力変化である。

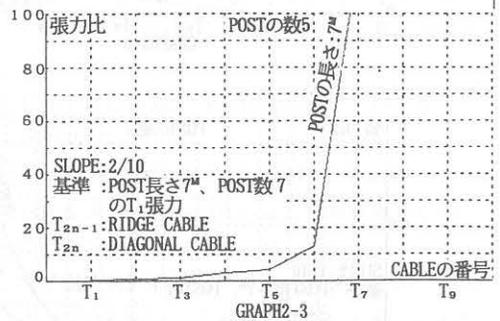
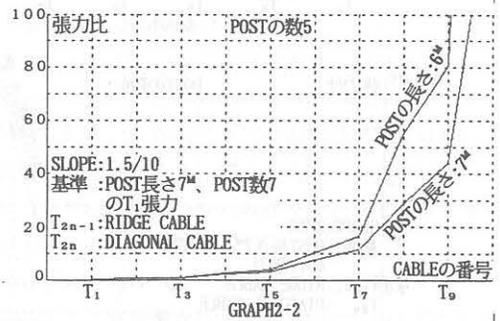
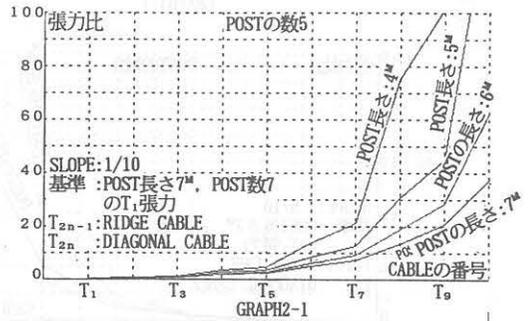
GRAPH 1-1 ではPOST長さが短くなることにより COMPRESSION RING 回りの RIDGE CABLE と DIAGONAL CABLE の張力がばらついているが、全体的には同一高さでも SPAN 変化による大きな張力比変化は見られない。GRAPH 1-2 と GRAPH 1-3 は全体的に GRAPH 1-1 と比べて張力比にばらつきは見られない。

全体的に、SPANの長さは多少差はあるが同一高さで計算する場合、若干応力の差が見られるのはSPANの長さが変化することにより屋根の面積が変わるためであ

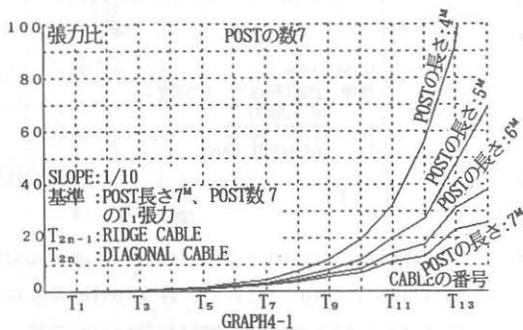
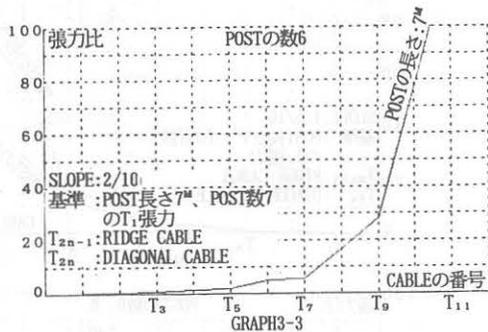
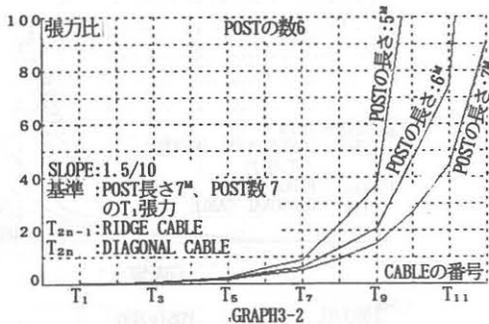
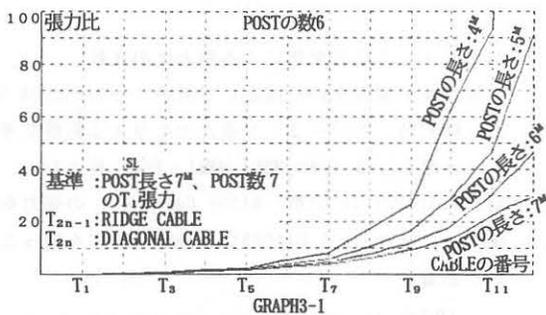
るが、同一高さによる張力比には大きな影響は与えていない。

4-2) FACTOR 変化による張力比の比較

屋根面分割数を16に固定して他の3つのFACTOR (SLOPE, POST数, POST長さ) が張力比に与える影響を考察する。張力比は、SPAN (MEDIUM級), POST 長さ7 (m), POST数7, SLOPE 1/10 の第一RIDGE CABLE (T₁) の張力を基準として他のRIDGE, DIAGONAL CABLEの張力を割ったものである。



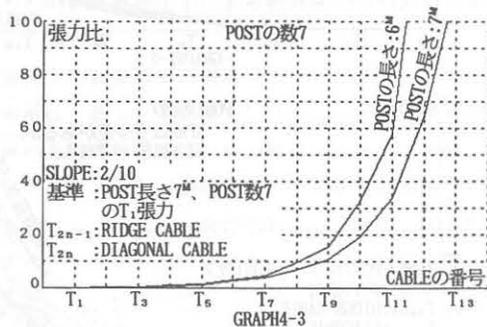
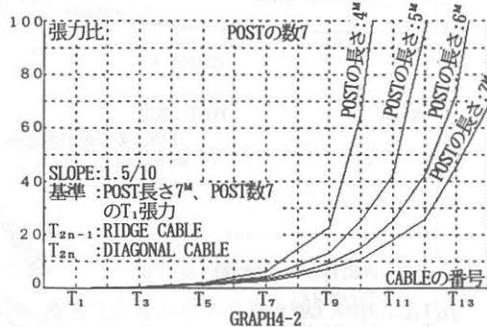
GRAPH 2-1, GRAPH 2-2, GRAPH 2-3 は、POST数5, SPAN 1/10, 1.5/10, 2/10 で、各々POSTの長さは、4 (m) 5 (m), 6 (m), 7 (m) である。POSTが長い7 (m) では、それほど大きな張力比の変化が見られてない。しかし、POSTが短い4 (m) では、T₇以後の張力比の変化が大きくなっている。急激な張力比の変化は、POSTの長さが長くなるにつれて減少している。



GRAPH 3-2 は、SLOPE 1.5/10 POST 数6である。POST 長さが 5(m) . 6(m) . 7(m) の張力比を GRAPH 2-2 と比較すると張力比のばらつきが小さくなっている。

GRAPH 3-2 の POST 長さ 7(m) は、GRAPH 3-1 の POST 長さ 5(m) と張力比の変化が似ている。

GRAPH 3-3 は、急激な張力比の変化が見られるが、GRAPH 2-3 に比べると多少張力比が減少している。GRAPH 3-3において、POST 長さ 4(m) , 5(m) , 6(m) の値はない。これは、POST の下部点が次の POST の上部点より高いところに位置され、この形態が成立しないからである。この GRAPH において T_9 から外側の CABLE の張力比が著しく増大しているのは、GRAPH 3-1, 3-2 よりも SLOPE 比が高く設定されているからである。



GRAPH 4 は、SLOPE 1/10, 1.5/10, 2/10, POST 数 7, POST 長さそれぞれ 4(m) . 5(m) . 6(m) . 7(m) , 雪荷重 60 (kg/m²) であるが GRAPH 2 , GRAPH 3 と比較すると張力比のばらつきが減少する傾向が見られる。

GRAPH 3-1, GRAPH 4-1 と比較してみると大きな張力比の変化が減少していることと POST の長さが短い方でも張力比の変化が見られていることである。

GRAPH 3-2, GRAPH 2-2 の張力比が違うのは、POST の数が増えれば POST 1本当たりの雪荷重の負担面積が小さくなるためである。同一 POST 長さでは、POST 数の多い方が、張力比の変化が小さくなる。

GRAPH 4-3 は、POST の数が増えても POST 長さ 6m , 7m , のみ張力比の変化が見られている。しかし、その張力比の変化も GRAPH 2-3, GRAPH 3-3 より良さそうではあるが、やはり急激な変化が見られる。

GRAPH 2-1 から GRAPH 4-3 まで以下のようなことが解る。全般的に SPAN に対する SLOPE 低い方が CABLE

の張力比の差は小さくなり有利である。

SLOPE は、同一SPANでは高いほうより低い方が有利である。それはTENSION DOMEのSLOPE は円球であるので、SLOPE が高いと外周部では屋根面の角度が大きくなる。その結果、COMPRESSION RINGから同一距離の屋根面では、POSTとRIDGE CABLE が合う節点高く位置されてRIDGE CABLE の負担が大きくなり(POST とRIDGE CABLE 間に発生する角度が小さくなる)、DIAGONAL CABLE とRIDGE CABLE の張力比には不利である。

POST数は雪荷重、風荷重を受けて直接RIDGE CABLE、DIAGONAL CABLE等の張力に影響を与える。

POSTの数が多ければPOST 1本が荷重を受ける負担面積が減少するので屋根面分割数と相関性をもっている。

POST数が増加することは張力比には有利であり、WIREの重量比にも影響を与えるが、そのかわりに節点数が増え、全体的に施工のCOST比がかかるので一概に経済的有利とは言えない。

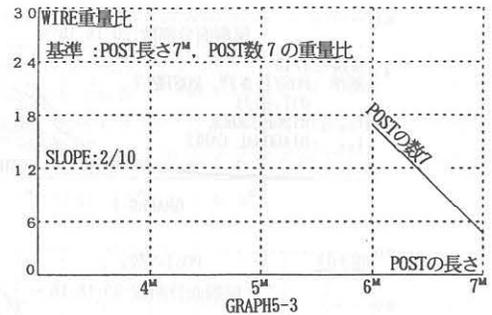
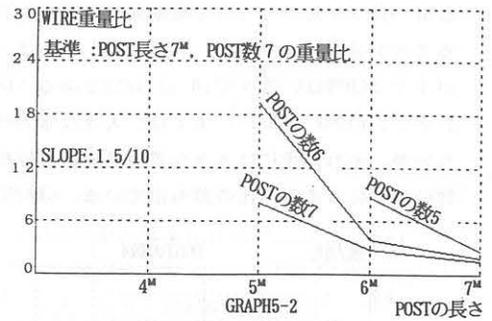
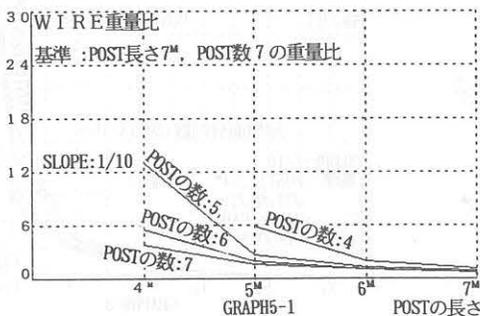
POST長さはSPANに対するSLOPE、POST数などによって決定される。また SLOPE比、POST数が同じ場合POST長さを変化させるとPOSTとDIAGONAL CABLEのなす角度が変化し張力比に影響を与える。POST長さは短ければ短いほど CABLE間の張力比のばらつきは大きくなり不利である。全体的に SLOPEとPOST数に関係なくPOSTの長さが長いほうが張力比には有利である。

しかし、POSTの長さが長くなると、張力比は良くなっているが、全体的に空間の活用という観点から見ると最も不利になる。

4-3) TENSION DOMEのWIREの重量比

ここで、WIRE重量比は、SPAN(MEDIUM 級)、POST長さ7(m)、POST数7、SLOPE1/10 のRIDGE、DIAGONAL、RING CABLE の総重量を基準に他のMODEL CABLE 総重量を割ったものである。

GRAPH 5-1、GRAPH 5-2、GRAPH 5-3 は屋根面分割数16、POST数4、5、6、7、SLOPE 1/10、1.5/10、2/10、



雪荷重60(kg/m²)、POST長さ4(m)、5(m)、6(m)、7(m)の場合の、それぞれの屋根全体におけるWIRE重量比である。

GRAPH 5-1 ではPOST長さ7(m)のWIRE重量比はPOST数に関係なく、ほぼ同様な値である。しかしPOSTの長さ4(m)ではPOSTの数が少なければ少ないほどWIREの重量比が大きくなっている。

GRAPH 5-2 のPOST長さが7(m)ではPOST数はWIREの重量比には大きな影響を与えていない。しかしPOSTの長さが5(m)ではPOSTの数によってWIREの重量比が違ってくることが解る。

GRAPH 5-3ではPOST数7、POST長さ7(m)でWIRE重量比に大きな差が見られる。

他の条件が同じであれば SLOPEが低ければ低いほど POST長さが長ければ長いほどWIRE重量比が小さくなり経済的な構造になることが分かる。

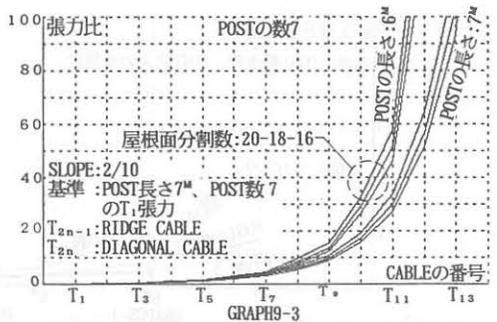
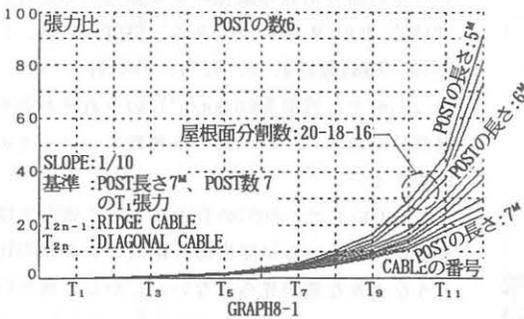
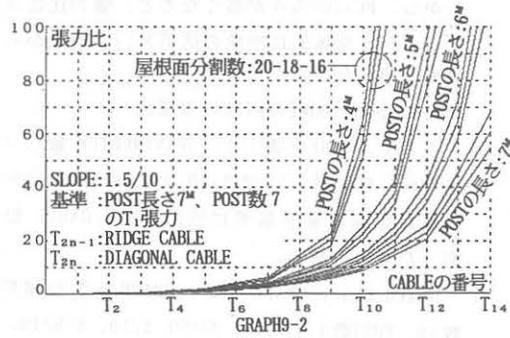
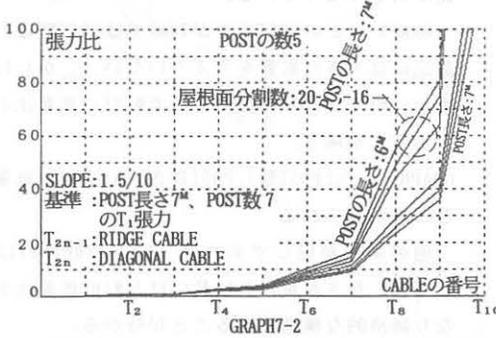
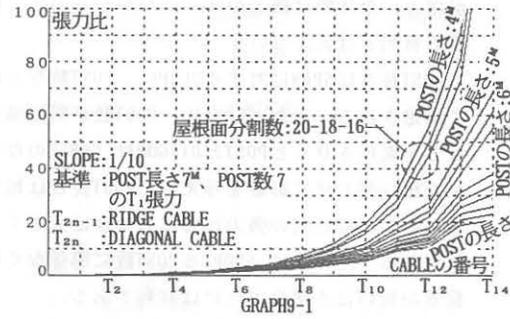
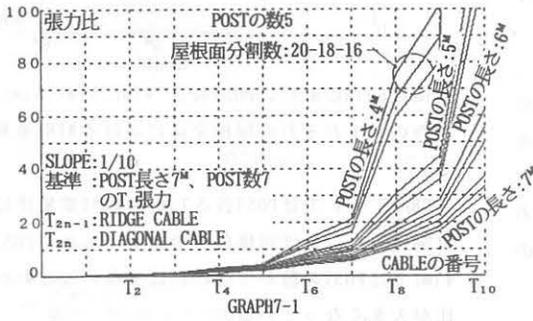
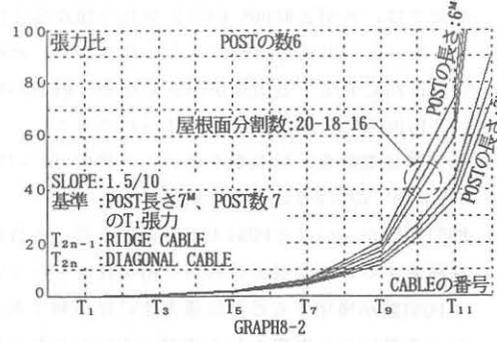
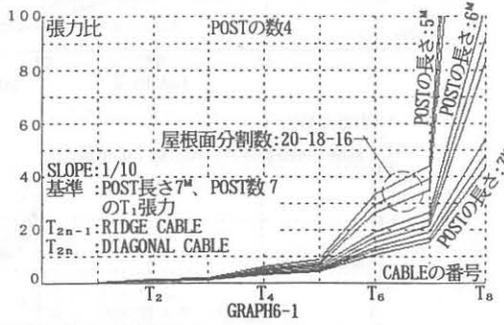
4-4) 屋根面分割数の変化による張力比の比較

SPANは MEDIUM 級同一である。SLOPE 1/10、1.5/10、2/10、POST数は4、5、6、7、Post長さ4(m)、5(m)、6(m)、7(m)で、雪荷重60(kg/m²)のそれぞれの形態で屋根面分割数を16、18、20の3種類についてその結果を比較する。

GRAPH 6-1 で、POSTの長さによって張力比は大きな差が見られているが屋根面分割数による張力比はそのような大きな差が見られない。しかし、同一CABLEで

はSPAN長さが短いところで屋根面分割数の影響を受けることが分かる。GRAPH 7-1 と GRAPH 7-2 は、POST数が5で SLOPEは、各々1/10、1.5/10である。GRAPH 7-2 のT₇(RIDGE CABLE)までは、大きな張力比の差はないが、それ以後には大きな差が見られ、屋根面分割数の違いによる張力比の差も出ている。GRAPH 7-1 で

は、GRAPH 7-2 と同様に、T₆までは、影響がなかったようであるが、T₇からは、POSTの長さや屋根面分割数によって大きな張力の変化が見られる。特に、POSTの長さが短いところでは、その差が著しい。

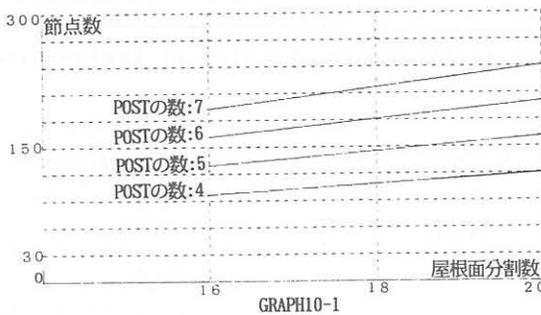


GRAPH 8-1、GRAPH 8-2は、POST数6、SLOPE は各々1/10、1.5/10である。屋根面分割数の影響を受けているのは、POSTの長さが短いところである。

GRAPH 9-1、GRAPH 9-2、GRAPH 9-3は、各々SLOPE が、1/10、1.5/10、2/10である。全般的に屋根面分割数の影響が少ないことが解るが、屋根の分割を増加するならば、SLOPE の比が低い方より高い方がより望ましい張力比になる。つまりPOST数は少ない方が、またPOST長さは短い方が、張力比の傾きが緩やかになる。

4-4) 屋根平面状態の節点の数の変化

GRAPH10-1 は、各々POST数4、5、6、7でそれぞれ屋根面分割数を16、18、20に変化させると節点数が増える。施工時には、節点数が少ないほうが手間がかからず工期も短縮されるので経済的に有利である。特にTENSION DOME構造では再導入張力を入れる場所が節点数と関係があるので大変重要である。



(5) まとめ

1) 屋根面分割数が多くなると、張力比とWIREの重量比には有利であるが、経済性と施工性については不利になると思われる。

2) POST数が多くなることは、張力比には有利でありかつWIREの重量比が減少する傾向が見られるが、節点数が増えるので施工する場合には経済性の検討が必要と思われる。

3) POST長さが長くなると、WIRE重量比が減少し、CABLEの張力比にも大きなばらつきは見られないが空間活用という点から望ましくない。

4) SLOPE比が高くなると、RIDGE CABLEとPOST間の角度が小さくなり、DIAGONAL CABLEとPOST間の角度が大きくなって張力比がばらつき、WIRE重量比の増加が著しいので経済性は低くなる。

以上のようにMEDIUM級SPAN(100(m)程度)のTENSION DOMEと言うものは、設計時に張力比、経済性、空間活用性、安全性等を考慮することによって、様々な形態ものがDESIGNされるであろう。

参考文献

United States Patent Office

Mike Cox & Jim Korff 論文 1973

吊構造 日本構造協会編 コロナ社

日経アーキテクチュア 1986.6.16

高重伯:「Tension Domeの構造設計法」 横浜国大

修士論文 1988

石井一夫:空気膜構造 設計と応用 工業調査会

建築の構造設計 鹿島出版会

SEOUL FENNCING 競技場の報告書 大韓造船公社

STUDY ON THE HYBRID CABLE STRUCTURE
- RELATING TO CRITERIA OF TENSION DOME -

Joong Baek k0 *1

SYNOPSIS

To design a structure of a MEDIUM TENSION DOME (span about 100m), we have to consider the various kinds of important factors, for example the length of the posts, the slope of the roofs, the number of the posts, the number of the divisional roofs.

Combination of the factors under the same load will affect the kinds of the prestress which are required by geometrical equation.

In case of a criteria decision, how to layout the factors, it depends on the shape of the tension dome one's favourite.

* 1 . Student of Dr.course, Department of Architecture, Faculty of Engineering.
Yokohama National University.