

オリンピック施設中の suspension 構造設計例

坪 井 善 勝^{*}
川 口 衛^{**}

東京オリンピックの各種競技施設の一つである、国立屋内総合競技場は、水泳、柔道用の主体育館と、バスケット競技用の付属体育館とからなるが、前者は、15,000人、後者は、4,000人を、収容するものである。建築設計は、丹下健三氏および都市建築設計研究所（代表神谷宏治氏）、設備設計は早大井上研究室による。

構造は、主体育館、附属体育館とも、suspension を採用したが、ここでは、紙面が限られているので、主として前者について説明する。

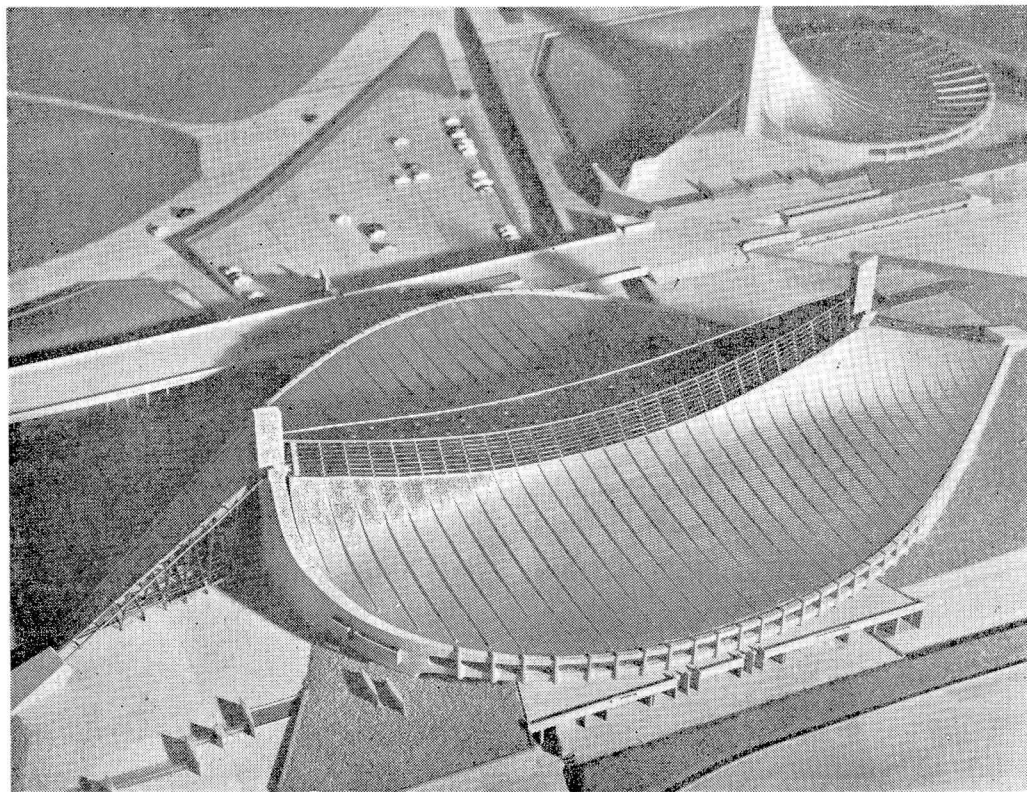


図-1

* 東京大学教授 工博

** 法政大学助教授

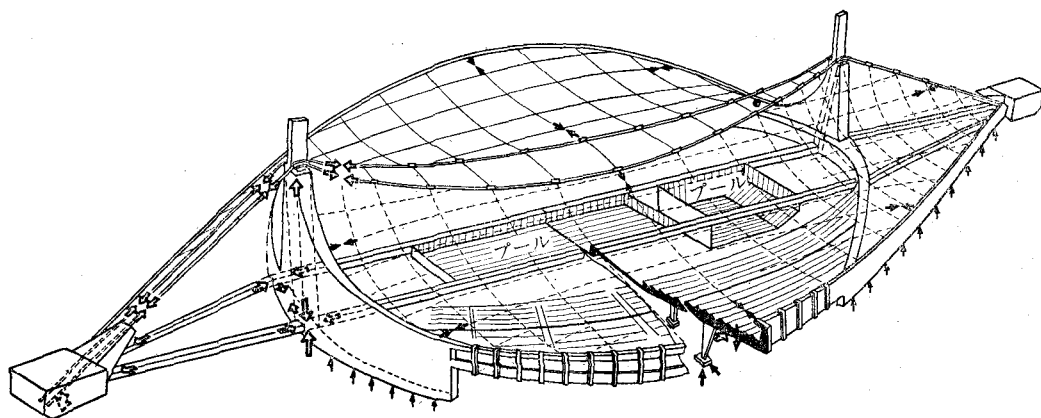


図-2

主体育館

主体育館は、写真および図に見られるように、吊り橋と類似の構造形式をとっている。

規模は、メインスパン126 m、サイドスパン44 m、横断面における最大スパン120 m、メインケーブルの最高点（サドル位置）は、地上27.523 m、メインケーブルのサグは9.653 m（直立投象）である。

メインケーブルは、サイドスパンでは、接近した平行線となっているが、メインスパンでは、トップライトおよび人工照明用の空間をとるため、レンズ状に開いている（最大間隔16.8 m）。

屋根は、メインケーブルから競技場スタンドの外周にかけて走る多数の吊り材で形成されるが、屋根面に剛性を与えるため、吊り材を縫って、これらにほぼ直角に多数の押さえロープを配し、これを緊張することによって、屋根構造全体にプリテンションを与える様になっている。2本のメインケーブルには、それぞれ、常時約1,350tの張力が働く。

メインケーブルには、外径330 mmであるが、その構成は、公称径52 mm ϕ のロープ31本、3.45 mm ϕ のロープ6本からなっており、いずれも引張強度150 Kg/mm²の素線よりなる片撚りロープで、見掛けのヤング係数は、16,000~17,000 Kg/mm²である。

メインケーブルに上記の張力がかかった場合、ロープ横断面の応力は、25.1 Kg/mm²で、破断に対する安全率は、5程度である。

吊り橋の場合には、破断安全率を3程度にとるのが一般の様であるが、ここでは、むしろ、建物としての必要上、剛性を高める目的で、応力を低く押さえている。

メインケーブルにかかる上記の張力は、アンカー部分で、アンカーブロックに1,270tの浮上り力を、また、タイには、2,380tの圧縮力をおよぼす。

アンカーブロックの重量は、約2,800t、アンカーブロックベース直上の土を考えた場合の重量は、4,900tである。

タイは、1.5 m×2.0 mの横断面を有するもの2本からなり、これがおたがいの間隔をひろげ乍らメインボール下に至り、ここで、プールの両側に設けられた競技観測、撮影用のトレンチに接続し、メインスパンでは、このトレンチが、圧縮タイを兼用している（オ2図参照）。

吊り材は、当初は、やはりロープを用い、これに、補剛用の鉄骨を添わせる計画であったが、ロープで構成される面は、建築造形上要求される、尖鋭な曲面を形成すると言う点で限度があり、ロープと補剛材および押さえロープの接合部が、かなり不経済なものになると言う結論に達したため、吊りロープを廃し、補剛鉄骨に、吊り材としての役を兼ねさせることにした。

この様にして採用された吊り鉄骨は、吊り材としての機能、吊り材をカタナリーからはずれた希望の位置に保つための曲げ材としての機能、屋根の高次の振動に対する補剛材としての機能をあわせもつものである。

吊り鉄骨の断面はI型で、フランジは22×190、ウェブは12mm厚で、せいは500～1,000mmの変断面、吊り鉄骨相互の間隔は4.5 mである。

吊り鉄骨を縫って走る押さえロープは、メインケーブルの各ロープと同じ機械的性質をもつ、公称径44mmφのロープで、吊り鉄骨のウェブを貫通して、相互の間隔1.5 m～3.0 mで走っている。

押さえロープの作る曲線は、屋根面に対して、近似的な測地線群となっている。

押さえロープに与える張力は、各ロープとも20t（PS係数20%）で、ロープは緊張後、吊り鉄骨ウェブにクランプされる。

屋根板は4.5mm厚の鋼板で、吊り材間に1.5 m間隔で設けられる軽量型钢の母屋にとりつけられる。

屋根面のエキスパンション ジョイントは、建物軸方向の伸縮に対しては、各吊り鉄骨添いに、また、吊り鉄骨方向の伸縮に対しては、鉄骨スパンを3分する位置に、設けてある。

模 型 実 験

屋根構造の静的挙動と振動性状を掴む目的で、1/30模型による実験を行った（オ3図）。実験は、吊り材がロープの場合、鉄骨の場合の両方を行ったが、ここでは前者の概要を記す。実験の詳細は、紙面の都合で割愛するが、次のA B条件の組合せを行った。

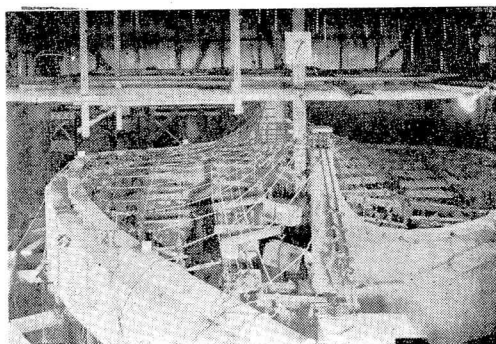


図-3

A. 荷重条件等

1. 自重
2. 追加荷重

全 面
片 面 (前参、左右)
部 分
3. 温度変化
4. 振 動

対 称
逆対称

B. プレストレス

1. PS係数 20%
2. " 40%
3. " 60%

ここに言うPS係数(Vorspannungsbeiwert)とは、押さえロープの張力の荷重換算値を、屋根荷重に対する百分率で表わしたものである。

温度変化は、 $+30^{\circ}\text{C}$ 、 -20°C に相当する部材の伸縮を、各ロープに与えることにより検討した。

振動実験では、可変速モーターの軸にとりつけた腕木の先端と屋根ケーブル上の1点とをバネでつないで、この点に周期的に力の変動を与えて屋根面を振動させ、屋根面各測点の上下加速度を測定した。

静荷重試験における、メインケーブル中央近傍の荷重-たわみ曲線を図4図に、押さえ網ブリテンションと剛性および振動周期との関係を図5図に示す。

以上の実験を総合して、次の様な結論が得られた。

1. ブリテンションの有無に拘らず、実験の載荷範囲では、荷重と変形の間に非線型性は見られない。
 2. 押さえ網によるブリテンションで、屋根の剛性は2~3倍に増加する。
 3. 上記の剛性増加の割合は、ブリテンションの大きさにつれて増大の傾向が見られるが、この関係は判然としなない。
 4. 前述の範囲での温度変化の影響は、ケーブル応力について、 $-10\% \sim +5\%$ 程度である。
 5. 本実験の載荷範囲では、ブリテンションは20%程度でも弛緩することなく、充分である。
- なお、ブリテンションによる剛性増加は、振動周期の測定にはあまり顕著に表われていないが、

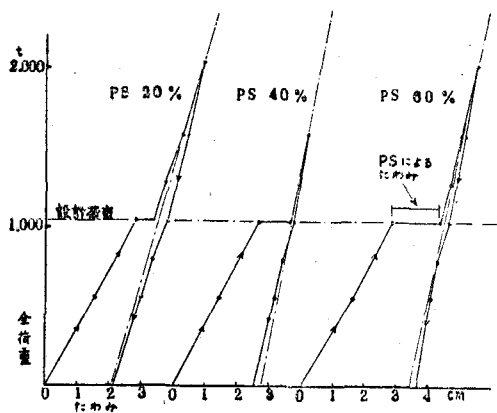


図-4

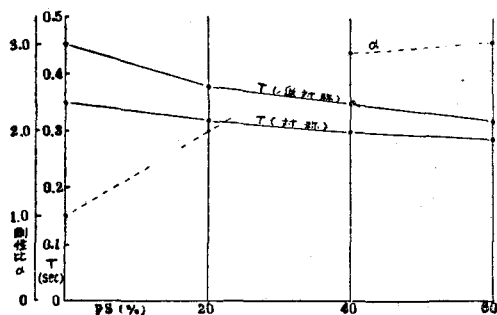


図-5

これは、ロープ交点をクランプしてないための、ロープ相互間のすべりの影響によるものと考えられる。

風に対する安全性の検討

一般にtwo wayのsuspension構造では、屋根の軽量化をねらうのが原則であるが、その場合、風に対する安全性の検討が不可欠になってくる。

この建物の場合にも、以下に述べる様に、風に対する静的および動的な検討を行った。

まず、設計用風荷重決定のための風力係数は、

1/300 模型による風洞実験を行い、定めた。

実験結果の概要は次の様である。

建物の軸方向（2本のポールを結ぶ方向）の風に対しては、屋根は、風力係数 $-0.2 \sim -0.3$ の、ほとんど全面吸上げを示す。屋根自重は 80 Kg/m^2 であるから、この場合は、自重と揚力が丁度相殺する程度である。

建物の軸に直角の方向に風が吹く場合にも建物の中央部分については、上と同様 $-0.2 \sim -0.3$ 程度の吸上げが支配的であるが、ポール付近の

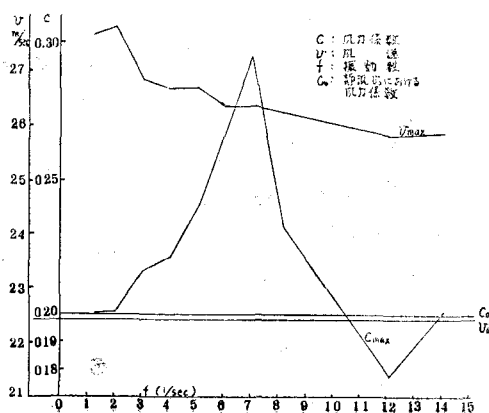


図-6

立上り部分には、大きな正圧を生じている。

次に風に対する、この建物の動的な挙動の検討であるが、構造のsystem から考えて、この建物の場合には、吊り橋に見られる様な、風による不安定現象は、まず起り得ないと思われる。しかし念のため、風の脈動に対する屋根の挙動を、定性的に把握することを目的として、次の様な実験を行った。

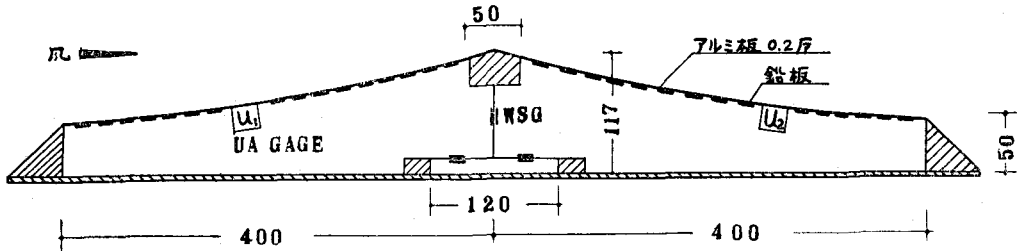


図-7

オ7図に示す様に、0.2mm厚のアルミ板で、屋根の横断面をとり出した模型を作り、両側面に添板をあて、間隙に無拘束の目張りをしたものを、風流の中に置いた。模型の一次振動数（横揺れ）は6.5cpsである。平均風速は約22 m/secで、与えた風速の変動は、 ± 7 m/secである。風に脈動を与える装置は、空気取入口に、4個の開口を設けた2枚の蓋をかさねて取付け、一方の蓋を手動で回転させて、開口面積を、周期的に変動させる様にしたものである。

屋根面の上下振動加速度は、風下側屋根面のほぼ中央にとりつけたU-Aーゲージにより、又、屋根全体としての横振動は、隣青銅板に貼った6枚のワイヤー・ストレイン・ゲージにより記録した。

測定の結果をオ6図に示す。

図から明らかな様に、本実験では、共振時の風力係数 C は、整流中の風力係数 C_0 の約1.5倍の値を示している。

2次以上の振動については、前述の様に、風に脈動を与える装置が手動式であるため、脈動サイクルに限度があり実験できなかった。

以上の測定と観察から総合的に判断して、本構造は、パネル・フラッターを含めて、風による不安定現象を生じないものと考えらる。

しかし、不測の暴風による屋根の共振に対して、更に万全を期するため、建物には、メインケーブルとメインポール頂部とを結ぶダンパー系を設け、オイルダンパー12個がとりつけられている。

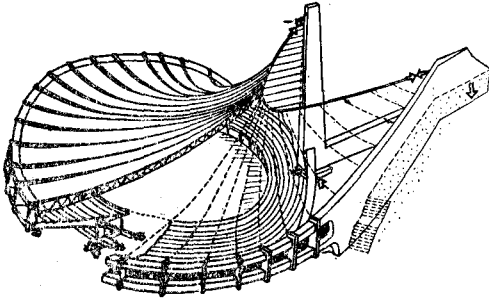


図-8

附属体育館

附属体育館も、構造原理は主体育館と同じであるが、**オ**8図に見られる様に、ここでは、1本のボールの頂上から、アンカーブロックをめぐけてメインパイプがらせん状にはしている。

このメインパイプの作っている空間曲線は、これにとりつく吊り鉄骨の材端での力についての立体的連力図の一つが定める曲線にきわ

めて近いものであるが、建築上の要求から、わずかながらこの曲線からはずれている。

この2つの曲線のずれと、荷重変動による吊り材張力の変化を、安定な形で処理するために、メインパイプとボールの間にトラスが設けられており、これがメインパイプと一体となって、一つの立体トラスを構成している。このトラスは、同時に、トップライト用のサッシェの支持構として用いられている。

メインパイプは、主体育館のメインケーブルとは異り、バックステイを有しない。このために生じる、柱とタイの曲げに対しては、P.S. 工法を用い、きれつ発生による剛性低下を防ぐよう考慮されている。

屋根面については、吊り材が鉄骨でつくられていて、曲げ剛性を有する点は、主体育館と同様であるが、異なる点は、附属体育館では、押さえロープを用いていないことで、そのかわりに鉄骨のつなぎ材をめぐらして、シェル作用を期待することにした。

謝 辞

本設計の種々の技術的問題の解決には、昨年完成した若戸橋の工事を担当された技術陣の方々の御協力をいただいた。とくに、日本道路公団工務部、建設省土木研究所橋梁研究室の方々に対して、厚く御礼申し上げる次才である。

なお、上記模型実験のたわみ測定には、東大生研丸安研究室の協力を得て、立体写真測量が行われた。

また、動模型実験は、日本大学田治見研究室で、風力係数の測定は、東北大学龜井研究室において行われたものである。なお、上記の研究は、文部省科学研究費によったものである。