

東京オリンピック国立屋内総合競技場とその模型 実験における写真測量の応用について

坪井 善勝・丸安 隆和・大島 太市・川口 衛

東京オリンピック国立屋内総合競技場の設計に際し、その構造設計を担当した坪井研究室*では、理論解析とあわせて、種々の実験を行なったが、そのうち主体育館については 1/30 の模型実験を写真測量の方法を用いて丸安研究室で実施した。構造物の撓み測定に写真測量の方法を用いることは、おそらく初めての試みであり、吊り屋根形状の各荷重状態における変形を三次元的につかむことができた。

1. 国立屋内総合競技場

国立屋内総合競技場は、東京オリンピックの主要施設として設計されたもので、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からなるが、前者は 15,000 人、後者は 4,000 人を収容しようとするものである。これらの建物の構造として、シェル、アーチ、ラーメン、サスペンション等が検討されたが、構造体の経済性・空気容積・音響効果その他居住性等について総合的な判断からサスペンション構造が採用されることになった。サスペンション構造は、基本的なタイプについての経験を一応積み、これを土台にして種々の方向への発展が試みられている段階にあるが、国立屋内総合競技場の設計に際しても、どのような形のサスペンションを造るかについて、デザイングループ、構造グループが一体となって、ディスカッションを行ない、いろいろな角度からのアプローチが試みられた。

主体育館は写真 1 および第 1~4 図に見るように、吊橋のケーブルに似た役をするメインケーブルが建物の軸

方向に 2 本走り、これからスタンドの外周を回る境界へ向かって吊り材をかけ、これによって定まる曲面を押え網で緊張して安定させている。メインケーブルは中央スパンではトップライトを取り入れるために、レンズ状に開いているが、この 2 本のケーブルはポール頂部で接近し、ここから平行になってバックステイ部分をはしり、

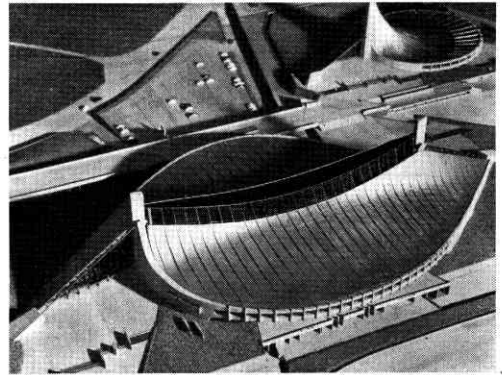
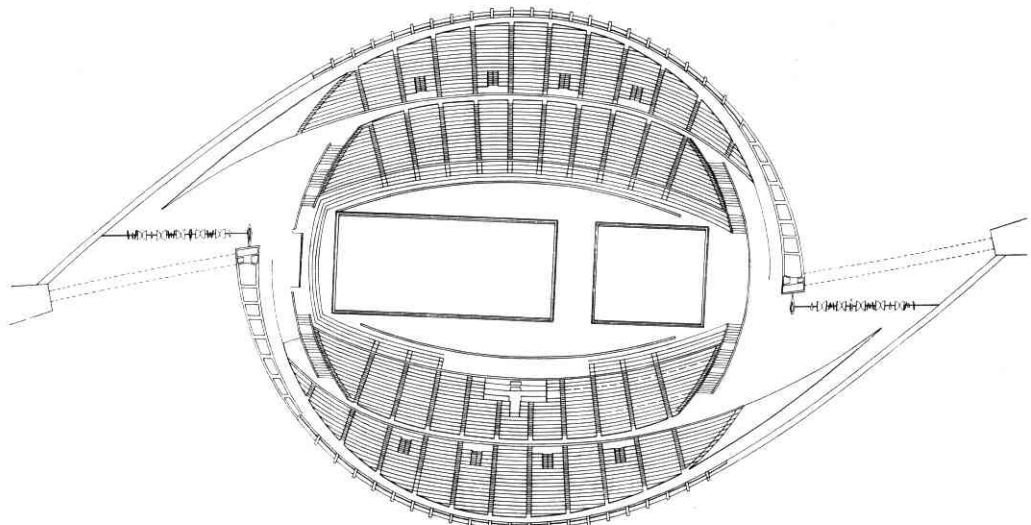
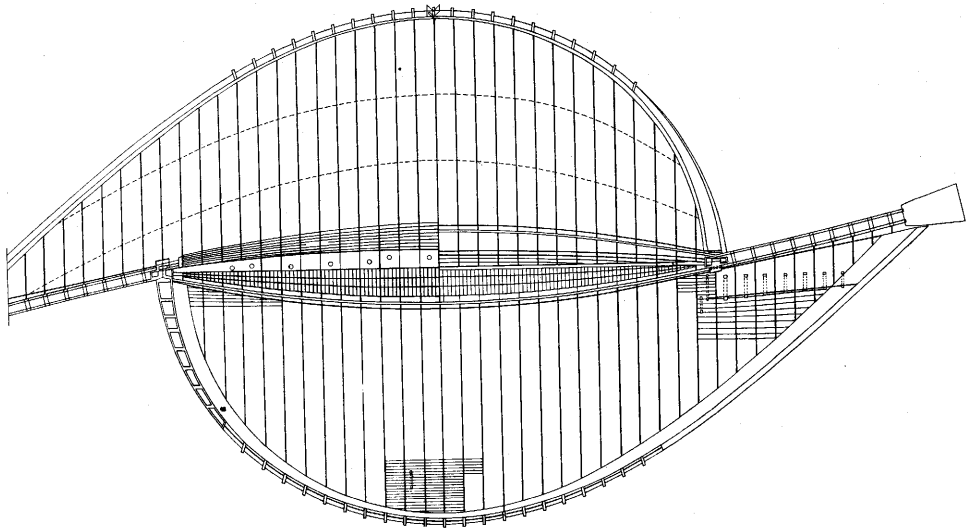


写真 1

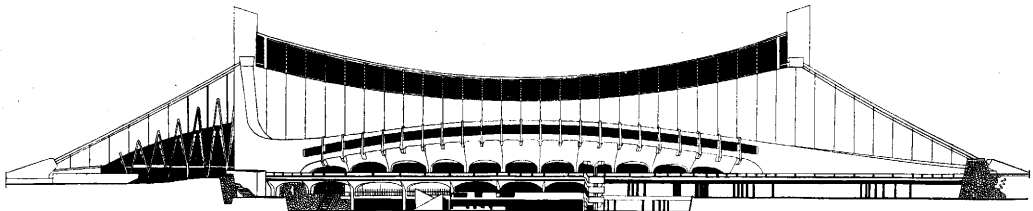


第 1 図 スタンドプラン

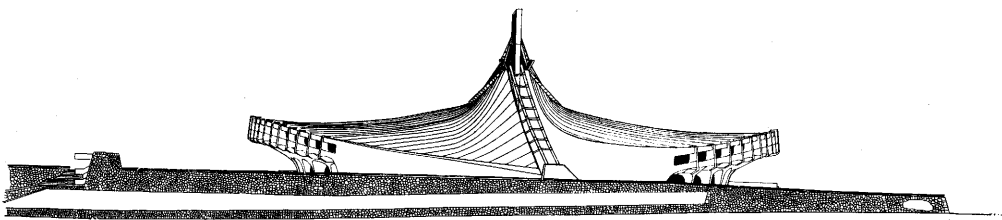
* 一般設計は東大工学部丹下健三教授および都市建築設計研究所（神谷宏治氏）によって、設備計画は早大理工学部井上宇一教授の研究室によって行なわれた。



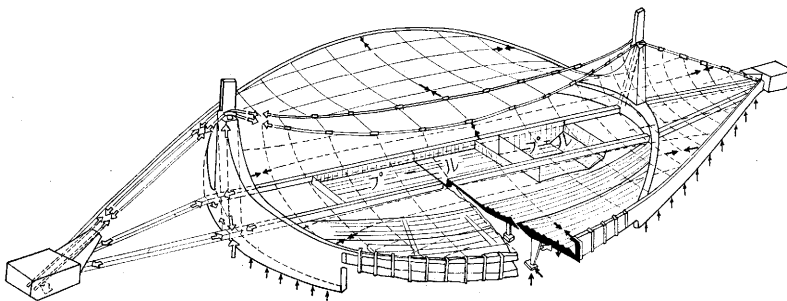
第2図 屋根プラン



第3図 南立面図



第4図 東立面図



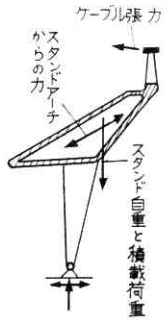
第5図 構造体と力の流れ (主体育館)

アンカーブロックに張力を伝えている。バックステイは視覚上の要求から建物軸線の真上を通らず、その水平投影象は軸線に対して傾斜している。このためポール頂部での中央スパンケーブルとバックステイケーブルの張力の合力の方向は、鉛直方向からかなりずれており、したが

ってポールの構造体も傾斜している。一方バックステイからアンカーブロックに達したケーブル張力はアンカーブロックの重量で向きを変えて、2個のアンカーブロック間に設けられた2本のタイに圧縮力をおよぼす。タイはポールとアンカーブロックの間ではこの圧縮力を受け

るために、特別に設けられているが、ポール相互間ではポールの照明、撮影用に設けられているトレンチがタイを兼用するようになっている(第5図)。

スタンドは横断面をとり出してみると1本足で柱脚が



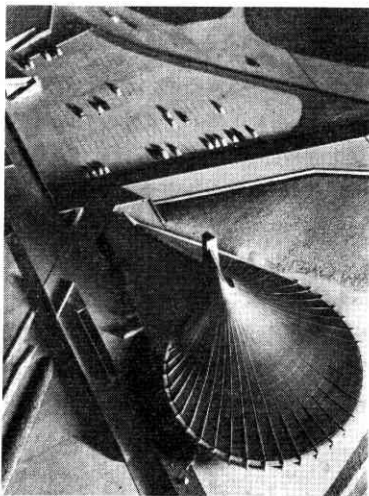
第 6 図

ピンに近いから不安定であるが(第6図)、スタンドスラブがこの断面の面外方向にのびて、アーチを形成しているため立体的に安定な構造となっている。スタンドは自重、積載荷重の外に頂部で吊り材、押え綱から力をうけるがこれらによるスタンドの抵抗が逆にスタンドアーチの荷重となる。積載荷重、ケーブル張力は相当の範囲にわたって変動するが、スタンドアーチはこれらの変動

に対して健全であるように設計されている。

メインケーブルは、公称径 52ϕ の片撚りロープ 31 本、同じく 34.5ϕ のもの 6 本よりなる。屋根面の形は造形上の要求から、吊り材方向断面が自然なカタナリー曲線からかなりはずれている。

このような曲面をつくるためと、屋根面の 2 次以上の



写 真 2

振動に対する剛性を高めるために、吊り材として I 型鋼が用いられている。

押え綱としては 44ϕ の同じく片撚りロープが用いられている。

ケーブルの破断強度は $15,000 \text{ kg/cm}^2$ 、見かけのヤング係数は $1.6 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 程度である。

付属体育館(写真2)も構造原理は主体育館と同一であるが、ここでは1本のポールの頂上からアンカブロックをめぐらして直径 406 mm、厚み 30 mm のメインパイプがらせん状にはしている(第7図)。

このメインパイプの作っている曲線は、これにとりつく吊り材の材端での力についての立体的連力図の一つが定める空間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、二つの曲線のずれと、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、メインパイプとポール間にトラスが設けられ、これがトップライトのサッシュ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異なり、バックステイ部分を有しない。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、きれつ発生によるこの部分の曲げ剛性の低下を防ぐように考慮されている。

屋根面については吊り材が鉄骨トラフで作られていて、曲げ剛性を有する点は、主体育館と同様であるが、異なる点は付属体育館では押え綱を用いていないことで、そのかわりに鉄骨のつなぎ材を用いてシェル作用を期待することにした。

スタンドは閉じたリング状になっているが、力の流れについては、主体育館と同様の考え方を用いている。

2. 模型実験の撓み測定のための目的

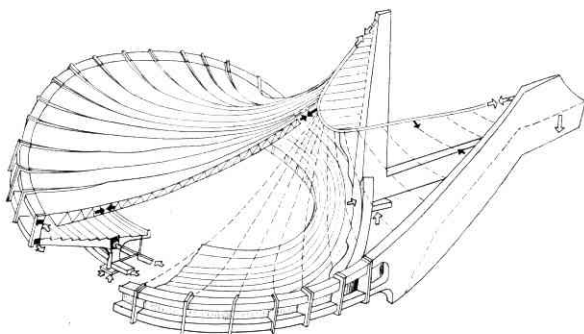
上述した国立屋内総合競技場の吊り屋根構造は、世界的にも、ここ数年の間に発展してきた新しい建築構造で、わが国では、二三の単純な形式のものがみられるに過ぎず、設計者・施工者ともに経験の浅い構造形式である。

したがってこの構造特性を把握する上において、模型実験の果たす役割は極めて大きいわけである。1/30 の模型による実験では屋根面の変形測定が主たるテーマとなった。今回模型実験の撓み測定に写真測量の方法を採用した理由は、

1) ケーブルによって構成される吊り屋根構造では、一般の曲面構造と異なり、歪み計による曲率変化の測定が不可能である。

2) ダイヤルゲージによる測定では、曲面変形中の特定方向についての成分しか得られない。さらに限られた数のゲージでは曲面の曲率の変化までをつかむことは非常に困難である。

3) 試験体が比較的大きく、また試験体に使用したケ



第 7 図 構造体と力の流れ(付属体育館)

ープルのヤング係数が低いので ($5\sim 9 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$) 変形量を写真測量で十分つかむことができる。

4) 撮影およびその撮影に必要な諸作業のために実験場で費す時間が非常に短い。

5) 写真で一度測定しておけば、撮影時の構造物の状況は任意の時に図化機に乾板をかけて再現でき、測定チェックができる。

6) 構造物全体の変形量を同時に一様の精度でつかむことができる。

3. 撓み測定の場合および日時

撮影は国電千駄ヶ谷駅前に作られた模型実験のための仮設物内で実施した。作業日程はつぎのとおりである。

撮影作業 昭和 37 年 11 月 25 日, 26 日

自動車や国電の走行時による振動の影響をさけるために撮影は 25 日の夜半より、翌 26 日の朝までの間に実施した。

オートグラフ A7 による図化測定作業 昭和 38 年 1 月 7 日~12 日

4. 模型実験の撓み測定に写真測量を用いる場合の問題点

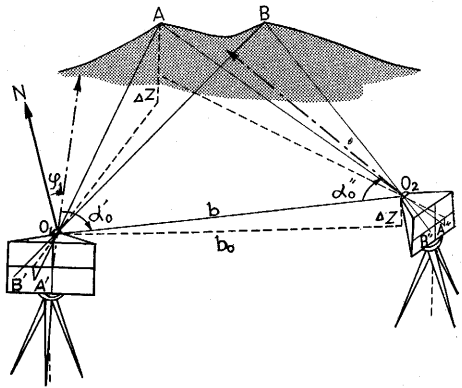
写真測量はある間隔だけ離れた 2 点から、一定の条件に整置したカメラを用いて撮影した立体写真像をもとにして測定を行なうのであるが、模型実験の測定の場合には、従来の地上写真測量と違って被写体までの距離が極めて短く、高い精度の測定が要求され、図面も Y_1 のフルサイズより $1/5$ の程度の縮尺で描くことが要求される。したがって、そのような至近距離物体測定のための写真測量が必要となる。そのためには、カメラの焦点距離を修正したり、それに応じた歪みを考慮したり、モデル被写体の測定しやすいようなカメラと被写体との関係位置やモデル表面の塗装を考慮したり、標定点の設置および図化、測定の方法についての最適方法の検討が必要となる。

特に、今度の場合には使用しなかったが、撓み途中の状況を把握するためには、2 台のカメラで同時撮影を行なう必要も考えられ、そのために、最近当研究室ではウイルドより 2 台の P30 写真経緯儀を購入した。

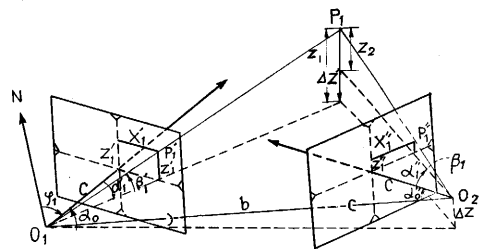
5. 地上写真測量の作業方法の原理とその使用機械

地上写真測量の測定は一般に撮影露出時におけるカメラ関係およびカメラの焦点距離、主点位置が明確に決まっていることに基づいている。

前者を外部定位、後者を内部定位とよんでいる。地上写真測量の場合には、航空写真測量の場合と異なり、カメラの関係位置、撮影軸方向等の外部定位が明確にきめることができるので、あとの図化測定が比較的簡単に処理できる。第 8 図に示すように A, B 2 点を含む対象物を写真とるのに撮影点 O_1, O_2 の点を選ばれる。



第 8 図



第 9 図

カメラの内部定位である主点位置・焦点距離・光学的歪み量は知られている。

外部定位の各撮影点の座標系, x, y, z カメラ軸方向を決定する φ, ω 角およびカメラ軸の回転角を決定する K 角が撮影と同時に分かっているなければならない。

第 9 図は点 P_1 の座標を決定する一般的な原理を図示したものである。

二つの撮影点から P_1 の点方向線は P_1' と P_2'' 点の像座標値から再現することができる。

左写真から O_1P_1' 光線の平面座標を使って角 α_1 と β_1 を決定することができる。

すなわち

$$\tan \alpha_1' = \frac{x_1'}{c}$$

$$\tan \beta_1' = \frac{z_1' \cos \alpha_1'}{c}$$

同様に右写真についても O_2P_1'' の方向角がきまるのでカメラの撮影方向がきまれば、 O_1P_1 と O_2P_1 の方向角は決定できる。また図から分かるように P_1 の高さもそれぞれに決定することができる。このことは両撮影点からの測定や計算のチェックに使われる。

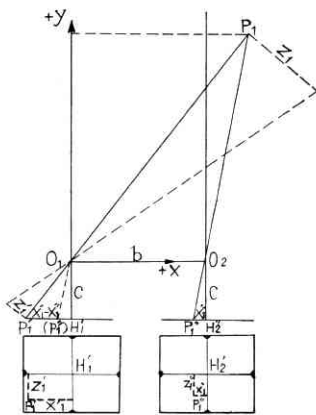
普通この標高決定の際のくい違いが縦視差と呼ばれるもので、そのくい違い量によって測定・計算の間違ひもある程度判断できる。われわれの実施している地上写真測量の精度は、この縦方向の視差差を無視できる程度にはるかに高い。

しかし場合によってはこの量を考慮に入れなければなら

らない場合もある。航空写真測量の場合には、この縦視差の補正は測定が行なわれる前に調整されなければならないが、この調整作業のことを相互標定と呼んでいる。

普通、各撮影点に関して与えられた標定点があれば、写真より求めた座標値と与件の座標値とから、これらの点のくい違いを発見することができる。これらのくい違いは前述の内部、外部定位、図化機械の僅かの誤差、像座標値の測定誤差に起因している。この座標値 x, y, z の中で、奥行方向の距離 y を決定するためくい違いが x, z に比較して大きく、そのくい違いは基線長と被写体までの距離比に大いに関係している。

この地上写真測量による撓み測定ではあとの図化測定



第 10 図

処理を簡便にし、精度をあげるために、撮影基線長に対して第 10 図に示すように直角方向に撮影が行なわれる。撮影軸方向は写真機の上面についている水準儀で水平に規制されて撮影される。

写真 3 にその使用したカメラを示す。このカメラのレンズはオルソプロタールで焦点距離 193.22 mm 最大わい曲収差 2~3 μ m、しぼりは $f=25$ に固定されている。

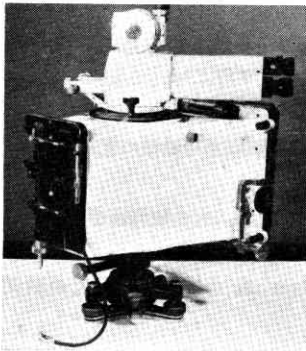
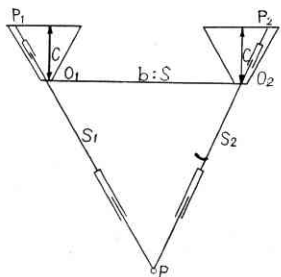


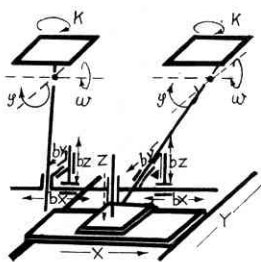
写真 3

撮影した一对のステレオ乾板を用いて、精密図化機、オートグラフ A7 (写真 4) によって測定される。この機械は、撮影時の 2 枚の乾板関係を機械的に

縮小された状態で再現するもので第 11 図がそれを示し、それぞれの乾板上の同一点、 P_1, P_2 点は金属ロッドに



第 11 図



第 12 図

よって、その方向に示され、その交差点として P 点が決定される。

第 12 図は機械の概略図を画いたもので、一对の乾板が撮影時の状態におくための標定作業の諸元の各部の作動方向を示している。

なお写真機の焦点距離はコリメータを使って測定した。写真 5 はそれを示し、写真 6 は至近距離撮影のために乾板圧定面に表面を 1/100 mm の精度で仕上げた角断面の金属を取り付けるための工作をしているところを示している。

6. 作業方法の概要

地上写真測量の場合には、ある距離だけ離れた 2 点から、カメラ軸を水平にかつ平行に設置して写真をとる。その撮影された乾板のステレオ像をもとにして、精密図化機によって測定をする。

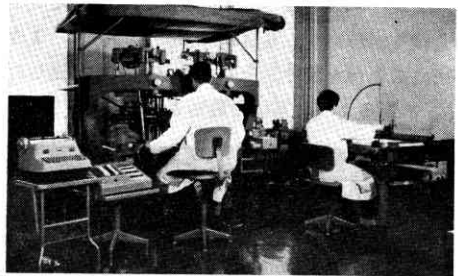


写真 4

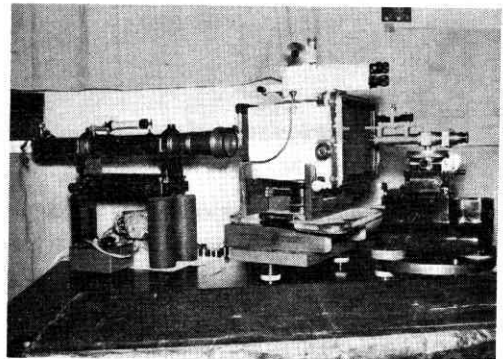


写真 5

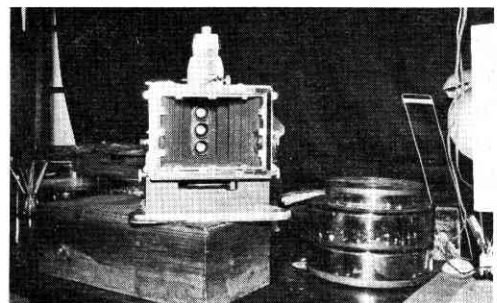
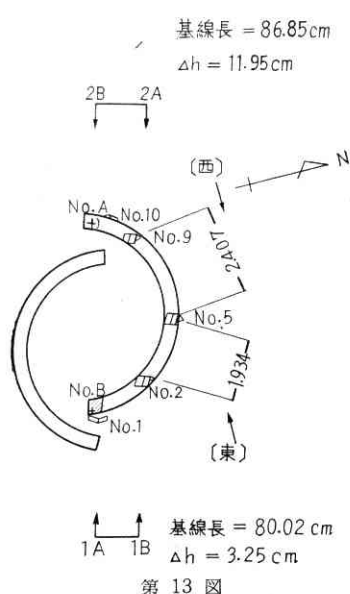


写真 6



第 13 図

根の全ぼうがわかり、写真により測定しやすいような高さの所に撮影台を設け、その上より撮影を実施した(写真7)。撮影点より被写体の最短点は約 4m であった。

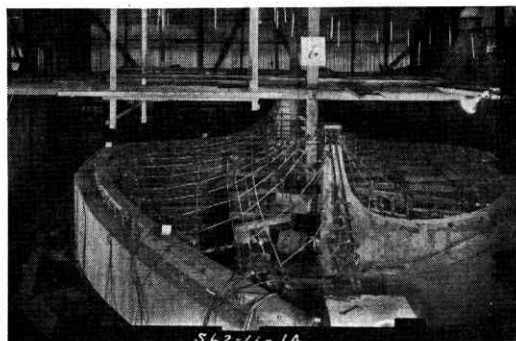


写真 7

撮影は屋根構造の施工を含めてつぎの 9 段階の荷重状態で実施した。カメラは 1 台であるために、あらかじめ各撮影点においてきめられた撮影方向に、各段階ごとにカメラをセットして実施し、同じ 9 段階の実験を二度行ない、1A-1B と 2A-2B でそれぞれ繰り返し、カメラをセットして撮影した。

9 段階の荷重状態はつぎのとおりである。

- 1) ロープ自重のみ
- 2) 屋根荷重の 1/2 載荷
- 3) 屋根荷重満載 (100 kg/m²)
- 4) 押え綱によるプレストレス導入
- 5) 北側半面雪荷重載荷 (60 kg/m²)
- 6) 他の半面にも雪荷重載荷
- 7) 5) と 6) による追加荷重除去
- 8) 全面除荷 (風荷重による全面 Suction)
- 9) 押え綱の張力除去

第 13 図は撮影点と被写体との関係を示した略図である。吊り屋根の北半分の撓みを調べるために撮影は 1A-1B, と 2A-2B の 2 基線で行ない被写体の各半分がそれぞれの数板で測定できるように撮影点を設けた。撮影基線の方向は、吊り屋根のメインロープに直角になるようにした。測定の吊り屋

7. 図化測定作業とその成果について

図化測定作業はオートグラフ A7 を使って、機械縮尺 1/15, 図化縮尺 1/2.5 で実施した。その際の Y 方向 (奥行方向) の描画の範囲は 2.10 m から 7.27 m である。

- 1) 東半分 (北側) のケーブルのみの荷重時の撓み曲線図縮尺 1/2.5 (第 14 図)
- 2) 東半分のケーブルの載荷緊張後の曲線図縮尺 1/2.5 (第 15 図)
- 3) 東半分のケーブルの撓み曲線図縮尺 1/2.5
- 4) 西半分 (北側) のケーブルの撓み曲線図縮尺 1/2.5

各ケーブルにつき上から無荷重、風による吸上げ、自重緊張、雪荷重の各状態を示す。

- 3), 4) の場合にはケーブルごとに高さ方向 1~5 cm (図面上) ずらしてその撓み図を描いた。

各ケーブルにつき最上線は無荷重、最下線は設計状態、中央は風による吸上げ状態を示す。

- 3), 4) の場合にはケーブルごとに高さ方向 1~5 cm (図面上) ずらしてその撓み図を描いた。

図面中◎印はダイヤルゲージ測定点を示し△—○—△は写真測定用のマーク点の位置を示している。

現在これらの成果品を用いて坪井研究室で種々の検討が行なわれている。

8. 得られた成果の精度について

得られた成果がどのくらいの精度で測定されているかをチェックするために、写真 8 に示すような縦横 2.40 m × 2.40 m のグリッド板を正確に作り、ケヤキ線を 40 cm ごとにひいてそのグリッド板を撮影点より 6.70 m くらいの所に垂直に、基線に平行において基線両端より撮影を行ない、オートグラフ A7 を用いて、そのグリッドの交点の座標値を EK-3 自動座標記録機に記録させて、実測座標値との比較を行なった。

それを示したのが第 17 図で二人の観測座標誤差をベクトルの的にあらわしている。測定は各人 5 回ずつ、別個に行ない、その 5 回平均の Δx , Δz 値を示したのが第 18 図である。

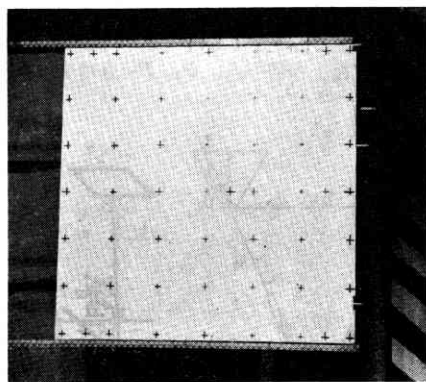
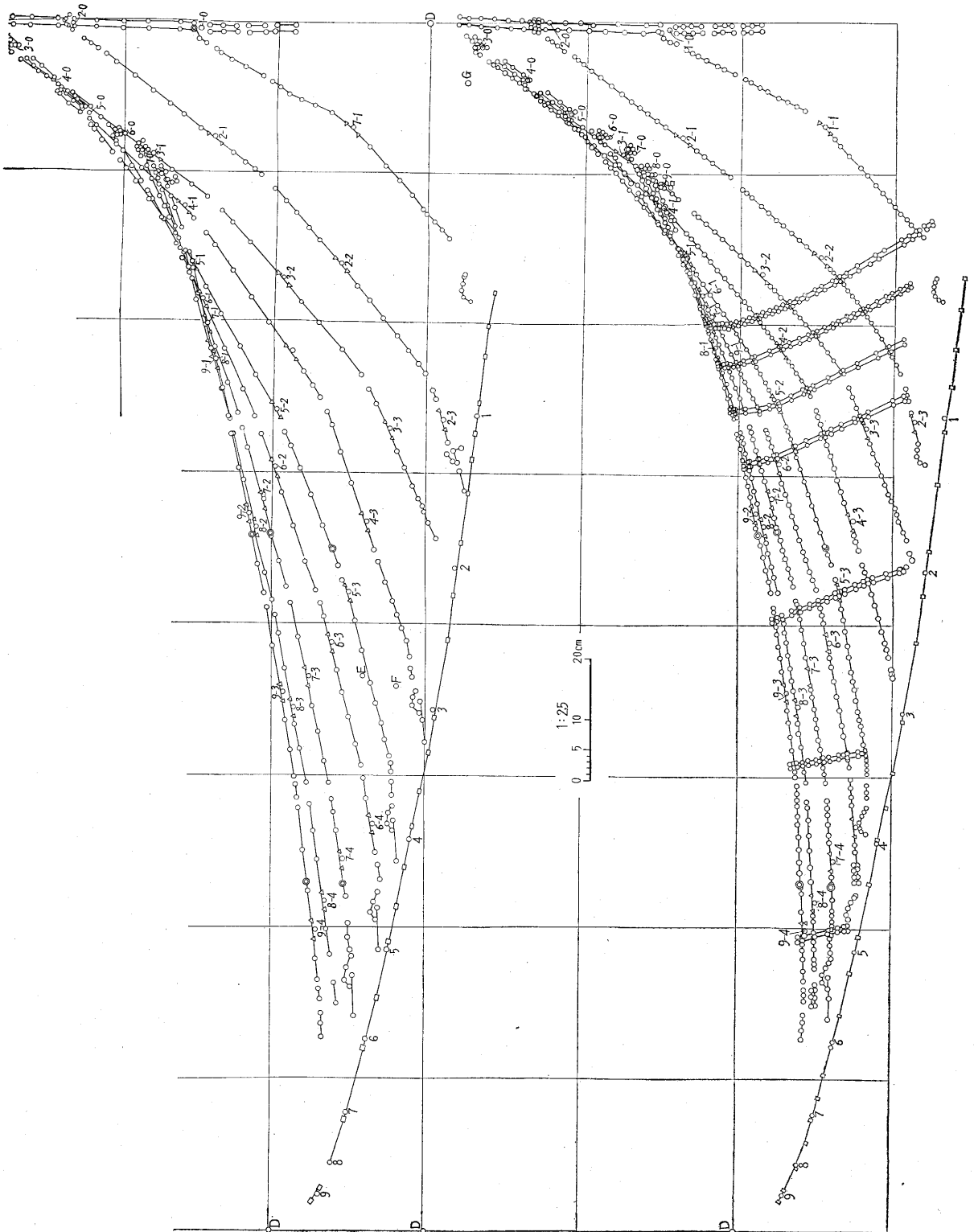
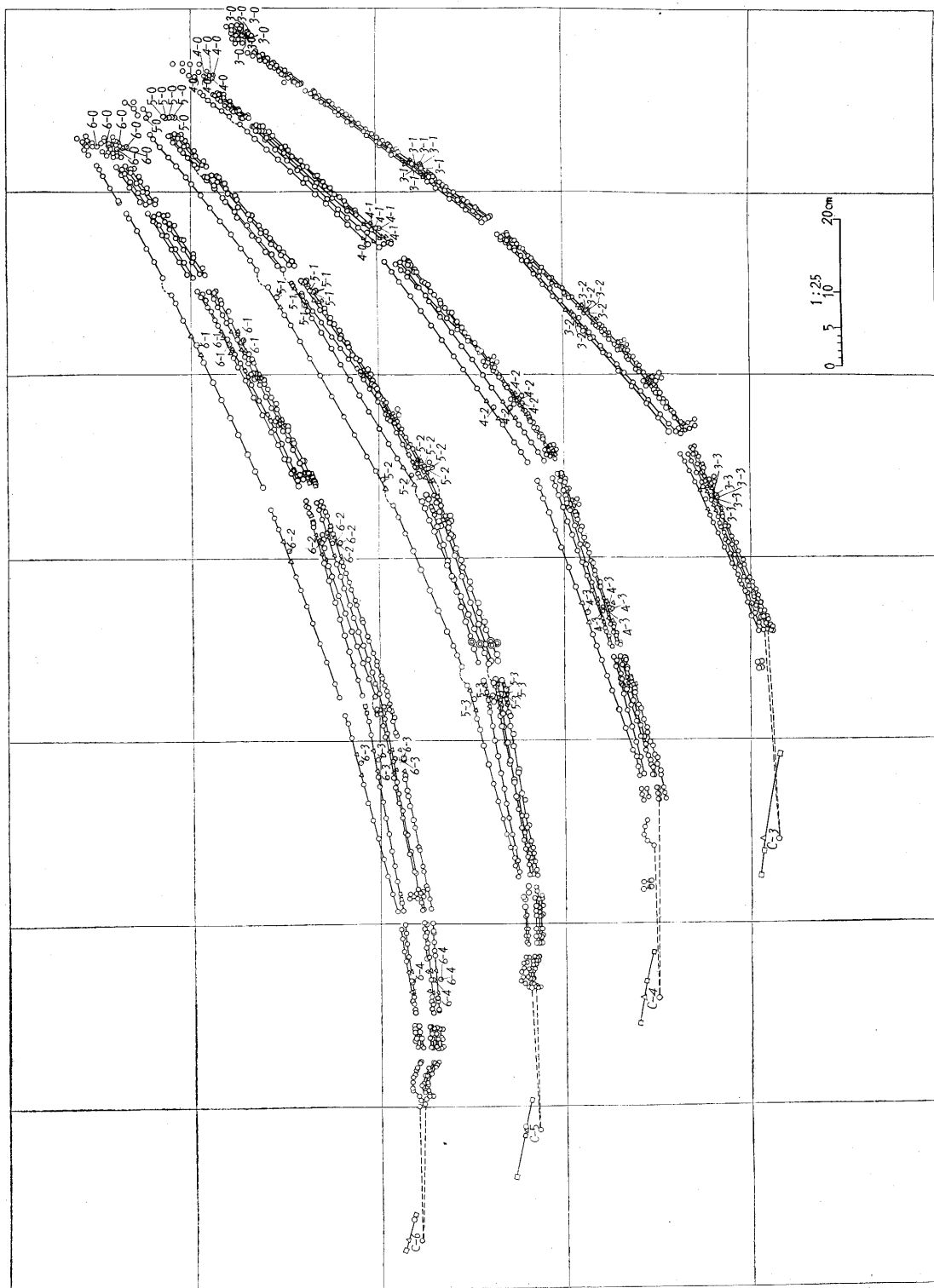


写真 8

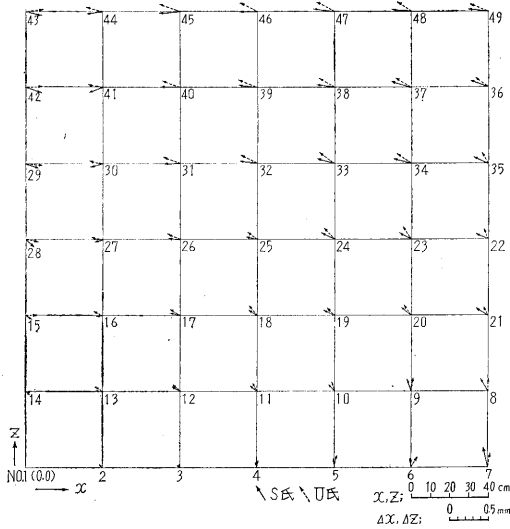
第 14 图

第 15 图





第 16 圖



第 17 図

これらの値の各測定の前乗誤差は

$$S \text{ 氏の場合 } \epsilon_1 = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x)^2}{47}} \doteq 0.59 \text{ mm}$$

$$\epsilon_2 = \sqrt{\frac{\sum (\Delta z)^2}{47}} \doteq 0.68 \text{ mm}$$

$$U \text{ 氏の場合 } \epsilon_1 = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x)^2}{47}} \doteq 0.48 \text{ mm}$$

$$\epsilon_2 = \sqrt{\frac{\sum (\Delta z)^2}{47}} \doteq 0.72 \text{ mm}$$

グリッド板には長年からの合板の良材を使用したが、若干グリッド板の伸縮はまぬがれず、またケヤキ線の描画誤差、測定の個人誤差もあるので、これらの精度は一応の見当を示すものと考えられる。

8. 測定結果の設計への応用

吊り屋根構造は前述のように、世界的にも新しい建築構造形式で、その解析方法についても種々の提案がなされているが、まだ確定的なものを見るには至っていない。

吊り屋根構造理論としては、曲面の立体性と、サスペンションの非線型性（吊り橋の撓度理論に相当）をともに含んでいるものが、正攻法であると考えられるが、これは解法が著しく複雑で、実用性を欠くおそれのあるこ

とは容易に推察できる。そこで一つの近似法として、微小変形理論（吊り橋の弾性理論に相当）が考えられるが、この方法を用いた場合の解の近似度は、吊り屋根の構造形式、荷重のかかり方などによって、まちまちである。

今回の実験でも荷重によるケーブルの変形量、変形の性質をつかみ、当面する構造に最も適した解析法を見出す手がかりにしたいという希望があったわけである。

写真測定によって、各ケーブルの全長にわたっての変形が得られたが、これにより一般の荷重に対しては微小変形理論が適用し得るという見通しを得ることができ、目下、この線に沿って、解析が進められている。解析の結果が出た場合にも、これと実験結果を比較する際に、ケーブルの変形が全長にわたって3次元的に記録されていることは非常に好都合である。

つぎに、建築設計の立場からは、今回の写真測定は、つぎのような意味で大いに利用された。

通常の建物の場合には、実験用のモデルにしても、実物建物にしても、形状は、型枠や現寸図によって、設計図の通りのものを形づくることができる。

しかし、サスペンション構造では、モデルや実物は、定められた形状の境界構造を製作した後、屋根面自体の形を定めるには、ケーブルの長さによる以外にない。

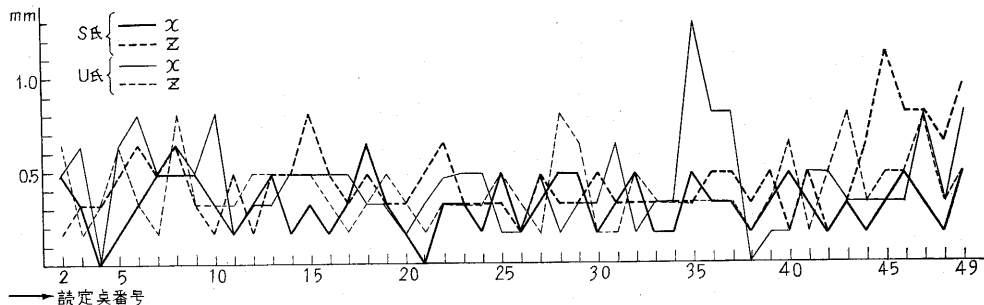
こうして出来上がった立体が、はたして設計図通りのものになっているかどうかの検討を、屋根面全体にわたって行なうことは、通常の方法ではまったく容易でない。

今回の実験に用いた試験体は写真測定結果の図化により、ほぼ正確に設計通りの形状が再現されたことを確認することができた。

まったく同様のことが、実物に対してもいえるので、建築現場での作業の進行につれて、実物の写真測定を行わない、施工管理の面にも利用する予定になっている。

なお、今回の実験においては、たわみの測定には1/100 mmダイヤルゲージを併用し、また模型各部の応力測定には、電気抵抗線歪計を用いた。これらの結果は、写真による変形の測定結果と、よい一致を示している。

なお、本研究は、昭和 37 年度文部省科学研究費によるものである。 (1963 年 6 月 25 日受理)



第 18 図