

中国（上海と北京）における大スパン構造

Large Span Structures in China

半谷裕彦*・米田 護*

Yasuhiko HANGAI and Mamoru YONEDA

中国、特に上海と北京に建設されている代表的な大スパン構造の構造設計と構造概要を紹介する。大スパン構造は主に体育施設に用いられており、全国主要都市には平板型のスペースフレームを利用した体育館が建設されている。大スパン構造を実現させる原動力には経済性の追求を第一に掲げている。

1. はじめに

中国はアーチ構造の故里である。紀元前から地下の墓室には煉瓦造アーチ構造が盛んに用いられており、前漢時代（前 202～後 24）の墓室が現存している。また石造アーチ橋として有名な安済橋（河北省趙県）は随時代（581～618）に築造されている。安済橋は橋長約 54 m、幅 9.6 m の扁平な単一アーチ橋であり、横力の処理に高度な技術を感じさせる。¹⁾ これらの伝統を背景として、アーチ構造は中国各地に無数に散存している。

中国における大スパン構造は 1953 年に完成した同济大学学生ホールに始まる。この建物にはアーチ構造が採用されており、伝統のつながりを感じさせる。しかし、現在、中国においては、大スパン構造を実現させる原動力として、経済性の追求を第 1 にあげている。1968 年の北京首都体育館の設計者である Tang Peiwei の言葉 “This structure requires less steel and the cost of construction is lower, …… Thereby this structure is compliance with the principle of achieving greater, faster, better and more economical results.”²⁾ がそれを裏付けている。1961 年には、国際卓球選手権のための北京工人体育館が完成している。この建物は 94 m スパンをもつ車輪型吊屋根であり、国際的にも高く評価されている。³⁾ 別のタイプの吊屋根としては、1960 年建設の浙江体育館があり、鞍型の 2 方向吊屋根を採用している。平板型のスペースフレームは体育館の屋根に多用されているが、⁴⁾ その代表的なものとしては上海体育館をあげることができる。中国（上海と北京）における代表的な大スパン構造を建設年代順に表 1 にまとめる。

1982 年 8 月、上海において有限要素法に関する国際会議が開催され出席した。それを機会に上海と北京における大スパン構造を見学することができたので、その構造の概略を紹介する。

2. 同济大学学生ホール⁵⁾

この建物は 1953 年、建築面積 4880 m² を有し、5000 人の収容人員をもつ学生ホールとして建設された。平面図

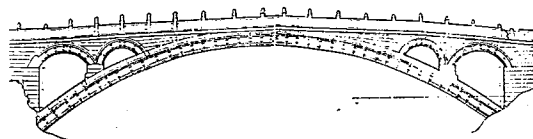
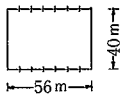
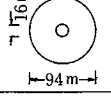
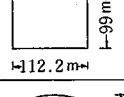
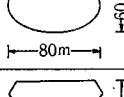
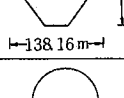
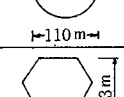
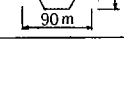
図 1 安済橋実測図¹⁾

表 1 大スパン構造の一覧表

建物名 設計・建設年	面積 収容人員	構造概要	平面形と規模
同济大学学生 ホール 同济大学 1953年	4880m ² (ホール 3350m ²) 5000人	アーチ型の R・C・ ラメラ構造	
北京工人体育館 北京市建築設 計院 1961年	42000m ² 15000人	車輪型吊屋根	
北京首都体育館 北京市建築設 計院 1968年	40000m ² 18000人 (固定16000)	チャンネル材の組 合せによる 2 方向 スペースフレーム (平板型)	
浙江体育館 浙江省工業設 計院 1969年	12600m ² 5400人	鞍型の吊屋根	
上海文化広場 屋根 同济大学 上海建築設計院 1972年	5700m ²	3 方向トラスグリッド 6.28m メッシュ (260ton)	
上海体育館 上海建築設計 院 1975年	31016m ² 18000人 (固定16050)	球ジョイントによる 3 方向スペースフレ ーム	
上海遊泳館 (建設中)	12300m ²	球ジョイントによる 3 方向スペースフレ ーム	

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

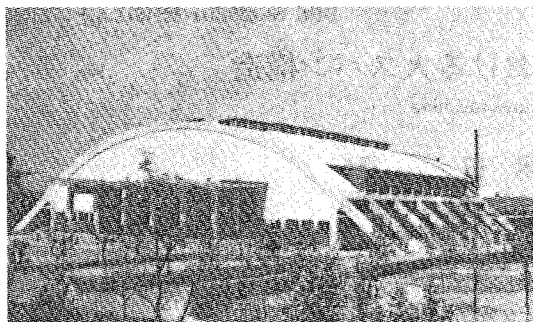
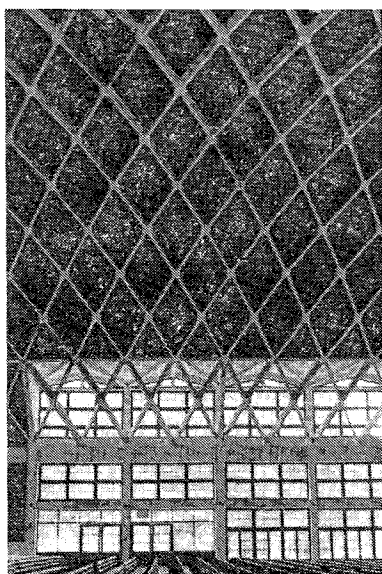
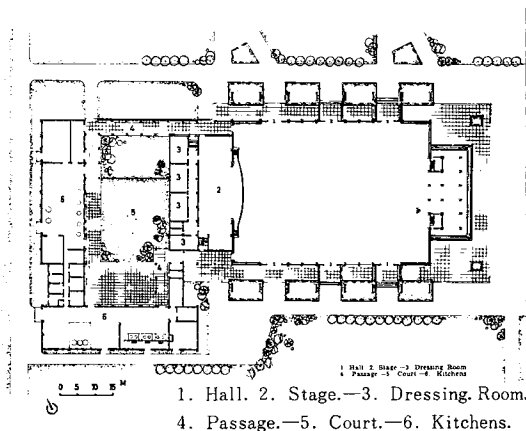
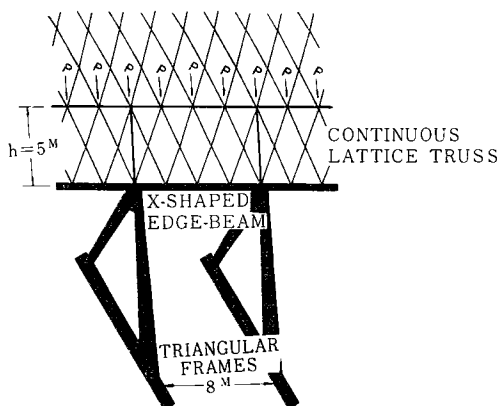
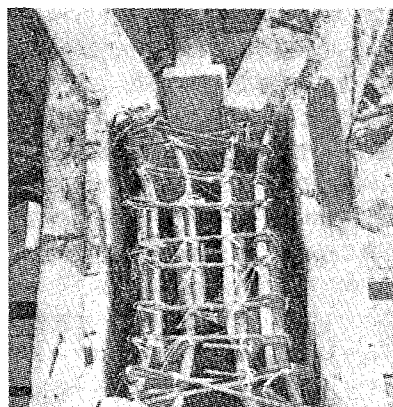
写真1 同済大学学生ホール外観⁵⁾

写真2 同済大学学生ホール内部

図2 同済大学学生ホール平面図⁵⁾

を図2に示す。40 m×56 mのホールに、プレキャスト鉄筋コンクリート部材から構成されているアーチ型ラメラ構造の屋根がかけられている。この屋根はX型をした裾梁と妻側のフレームに支持され、さらに、裾梁は8 m間

図3 同済大学学生ホール軸組図⁵⁾写真3 同済大学学生ホールジョイント⁵⁾

隔に配置された3角形の形状をもつフレームに支持されている(図3)。この3角形フレームの高さは6 mであり、アーチのライズはスパン40 mに対して8 mである。図3に示すように、裾梁から5 m離れた位置に母線方向の部材を組み込んでラチストラスを構成し、裾梁に作用する曲げモーメントを緩和している。10 cm×45 cm×2.6 mのプレキャスト鉄筋コンクリート部材の接合方法として、写真3に示すように、wet joint方式を採用している。3角形フレームに作用する水平方向スラストを処理するために、チャンネル材をタイとして用いている。建設後2年の時点で、フーチング基礎の沈下量は3~4 cmであり、クラックは生じていない。この建物に使用された鉄筋とコンクリートの量は、床の単位面積当たりで換算して、27.3 kg/m²と0.188 m³/m²であった。このうち、裾梁を含む屋根には、20.2 kg/m²と0.12 m³/m²が使用されている。

3. 北京工人体育館⁶⁾と浙江体育館⁷⁾

1961年、国際卓球選手権大会のために建設された94 mの直径の円形プランをもつ放射状吊屋根である。42、

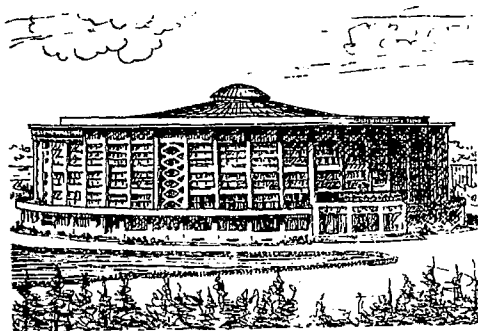


図 4 北京工人体育館外観⁶⁾

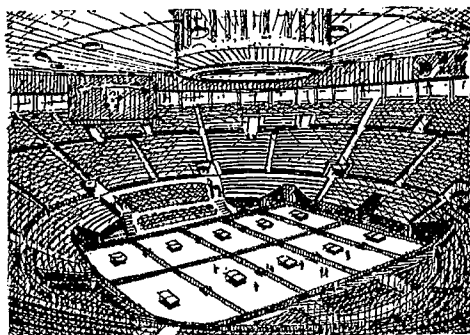


図 5 北京工人体育館内部⁶⁾

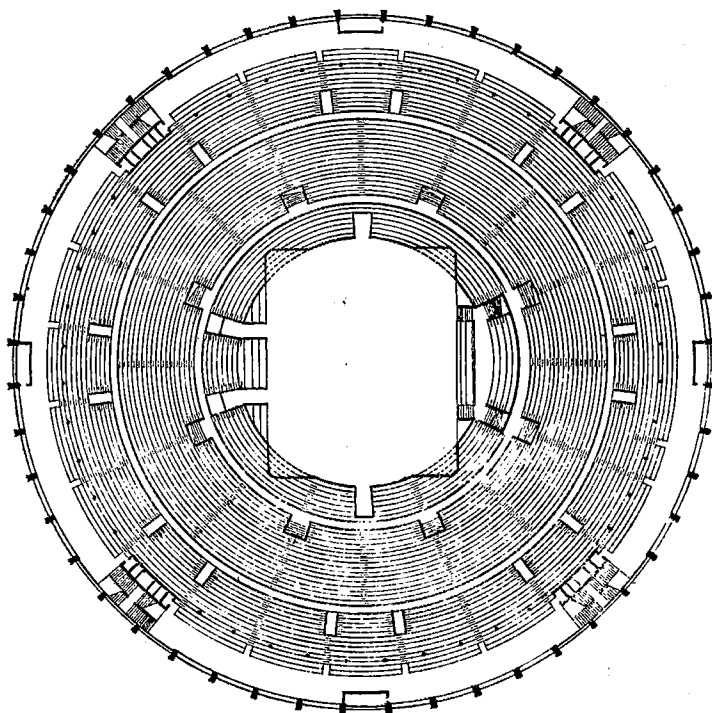
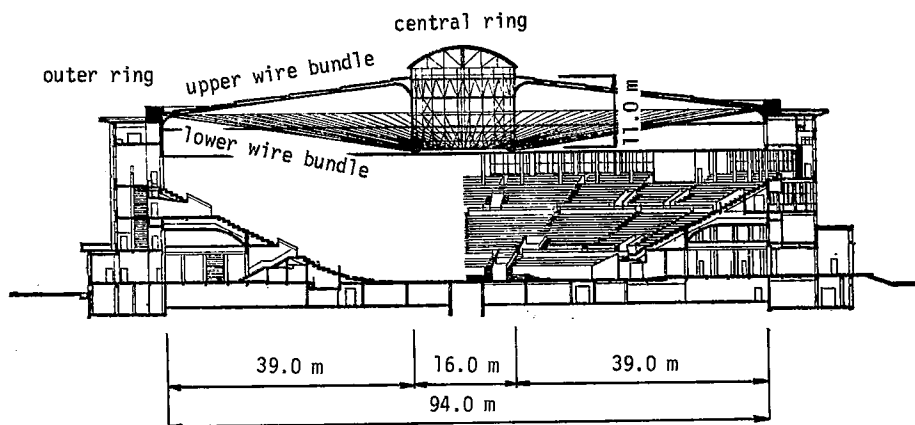


図 6 北京工人体育館断面図および平面図⁶⁾

000 m² の建築面積があり、収容人員は 15,000 人である。この建物の外観および内部の様子を文献 6) に記載されているスケッチ (図 4, 5) で示す。

構造概要を図 6 に従って述べる。この吊屋根は外周リング、中央リング、2 層の放射線ケーブル (全部で 144 本) で構成され、いわゆる車輪型吊屋根と呼ばれるものである。外周リングは 2 m×2 m の正方形断面をもつ鉄筋コンクリート梁で、直径は 94 m であり、作用している面内圧縮力は 2,300 t である。このリングは回廊の屋根と一体打ちされており、48 本の柱で支持されている。中央リングは直径 16 m、高さ 11 m の円筒形フレームであり、上端および下端に鋼製リングを設け、820 t および 1,530 t の面内引張力を処理している。中央リングの重量は 215 t である。高張力鋼を用いたケーブルは、吊りケーブル (72-φ5, 0.011 t/m) と押さえケーブル (45-φ5, 0.006 t/m) で構成されている。おのおののケーブルは端部に輪が設けられ、ピボットボルトにより中央リングに接続されている (図 7)。屋根材としては自重の低減と水密性を満足させるため、アルミニウム板を採用している。

構造解析としては、建設段階に沿った静的解析と完成後の固有振動解析をおこなっている。安全率を $K=2.5$ とし、全荷重時の K の値を求め、比較している。静的解析結果を建設段階に沿って示すと表 2 となる。最後の欄の値は建設時の測定値であり、解析値と良い一致を示している。中央リングの全変位は $\Delta=\Delta_1+\Delta_2+\Delta_3=67$ cm (測

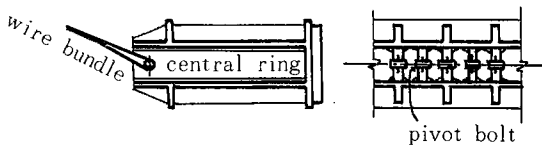


図7 ケーブルの中央リングへの接続⁹⁾

定値: 69.0 cm) であった。次に、固有振動解析に移ると、中央リングの質量がケーブル質量に比して大きいので、リングの中央に集中質量がある 1 質点系として扱っている。鉛直方向振動の固有周期は 0.963 秒であり、0.3~1.5 秒の間に入るので風や地震による共振の危険は無いとしている。⁹⁾ なお、建設後の実測値は 1.17 秒であり、水平方向振動の固有周期は 1.30 秒であった。押さえケーブルと吊りケーブル自身の固有周期はそれぞれ $T_u=1.82$ 秒、 $T_e=0.33$ 秒であり、かなり異なった値となっている。そのため、局所的な振動を制限するためにケーブル相互をワイヤーで結合している。風荷重を受ける場合の実測では、2~3 レベルに対して最大変位は 0.05 mm、4~5 レベルにおいて 0.2 mm であった。

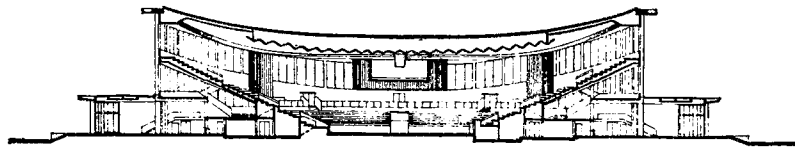
本建物の場合においても経済性の追求に言及しており、屋根面の鋼材使用は 40 kg/m² のみであったとしている。なお、建設に要した実質労働日数は 50 日であった。

吊屋根の基本的な形式には一方向吊屋根と二方向吊屋根がある。前述した車輪型吊屋根は一方向吊屋根に属する。二方向吊屋根の特長は境界構造の形に現れるが、多用されるものとしては、境界形が 2 個のアーチ (ローリー競技場、ベルリン議会ホール、香川県立体育館)、境界形が円形 (ミラノの競技場、ザールのテレビ局)、境界形が長方形 (ルドウィスハーフェンの公会堂、茨城県笠松運動公園体育館)、などがある。⁹⁾

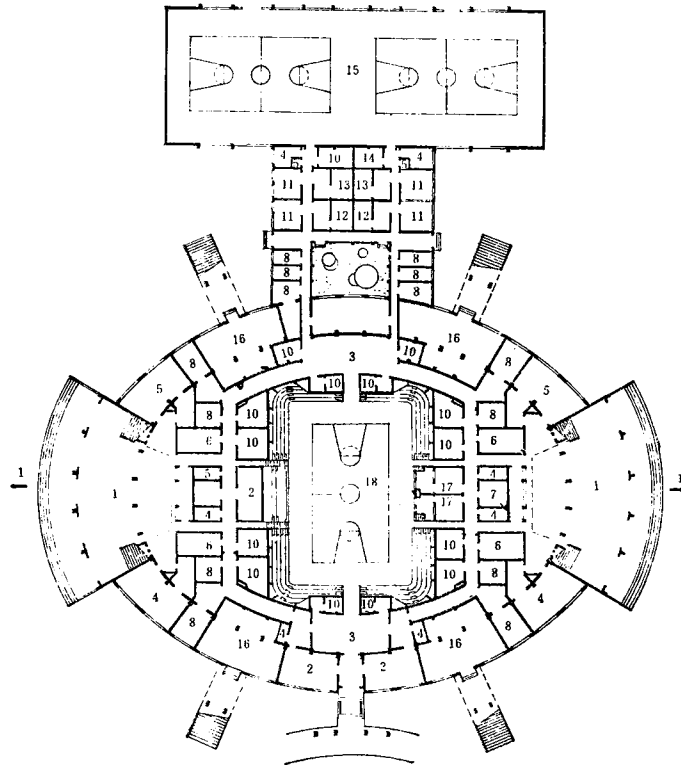
図 8 に示す浙江体育館は境界形が楕円 (円の変形) の二方向吊屋根に属する。楕円の長軸および短軸の長さはそれぞれ 80 m、60 m であり、建築面積は 3,780 m² で 5,400 人の収容人員を持っている。建物外周の柱によって支えられた縁梁は、2 m×0.8 m の矩形断面をもつ鉄筋コンクリート梁である。長軸および短軸の両端の高さは、20 m と 13 m であり、差は 7 m となっている。断面積 5.

表 2 静的解析と実測との比較

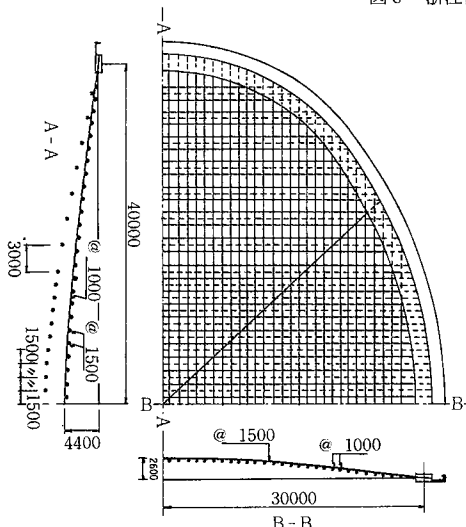
段階		押さえケーブル ton	吊りケーブル ton	中央リングの 鉛直変位 cm	変形図
I	解 析	3.29	5.88		
	実 測		5.8~7.2		
II	解 析	3.29	13.71	$\Delta_1=16$	
	実 測		11.3~19.0	$\Delta_1=14.4$	
III	解 析	25.0	38.97	41 $\Delta_2=25$	
	実 測		37.0~42.3	45 $\Delta_2=30.6$	
IV	解 析	35.8	65.34	67 $\Delta_3=26$	
	実 測			69 $\Delta_3=24$	



0 10

図 8 浙江体育館の断面図と平面図⁴⁾

0 10

図 9 ケーブルの配置図⁷⁾

28 cm² (7φ4-12) のケーブルを図 9 のように配置している。吊りケーブルおよび押さえケーブルの間隔はそれぞれ 1 m と 1.5 m となっており、サグ比はそれぞれ 1/18 と 1/21 である。ケーブルの自重は 7 kg/m² であり、雪荷重を含めた屋根面の受ける荷重は 120 kg/m² としている。この静荷重下において吊りケーブルに作用する軸力は 25 t となり、安全係数は 3.4 となる (押さえケーブルの安全係数は 4.7、材料強度は 16 t/cm²)。また、固定、積載 (雪) と同時に風荷重を受ける場合には、吊りケーブルの受ける最大軸力は 31 t となり、安全係数は 2.7 となっている (押さえケーブルは 22.5 t で安全係数 3.7)。風荷重に対しては 1/200 模型による風洞実験を実施している。この建物に使用した鋼材は 65.2 t となっている。

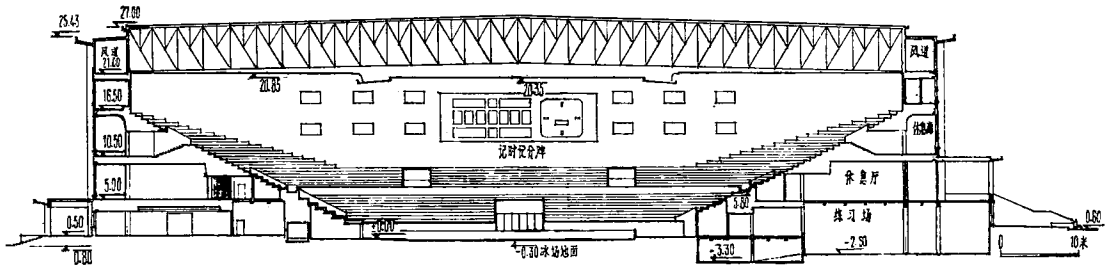


図10 北京首都体育館断面図 (建築設計資料 9 より)

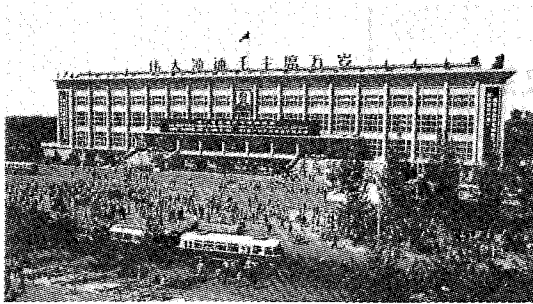
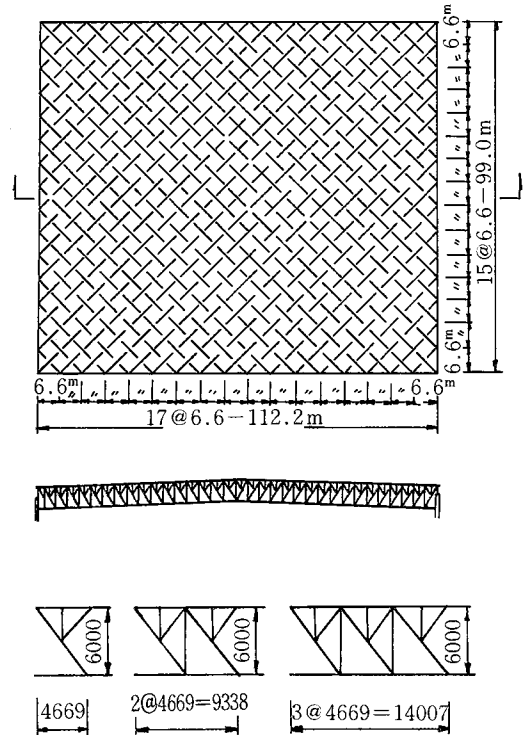


写真4 北京首都体育館の外観 (北京首都体育館絵葉書より)

4. 北京首都体育館²⁾と上海文化広場屋根³⁾

平板型のスペースフレームを採用した建物として、北京首都体育館 (1968 年) と上海文化広場屋根 (1972 年) があげられる。前者はチャンネル材、後者はボールジョイントで接合されたパイプを使用している。文献 4) に収録されている体育館は北京首都体育館と同一の形式を採用しているものが多い (たとえば、南京五台山体育館)。

北京首都体育館の外観を写真で、スペースフレームの軸組図を図 10 に示す。スペースフレームの大きさは、112 m×99 m で、地上の高さは 20.5 m であり、建築面積は 40,000 m² で収容人員は 18,000 人である。計画段階において一方向架構 (beam girder system) とした場合との使用鋼材の比較をおこない、スペースフレームの方が 30 % の節約となることを示し、スペースフレーム採用の根拠としている。スペースフレームは、3 種類のユニットを 544 個組み合わせて構成している。ユニットの詳細を図 11 に示すが、上弦材は 2L125×10 (断面積 48.7 cm²)、下弦材としては 2L100×8 (31.2 cm²) を用いている。スペースフレームは、6.6 m 間隔にたてられた鉄筋コンクリート柱に単純支持の境界条件として支持されている。構造解析は、連続体としての平板 (Fourier 級数を使用)、差分法、有限要素法の 3 種類でおこない比較している。解析に用いた鉛直荷重は $q=220\text{kg/m}^2$ で、その時の結果は、中央点の変位：差分法 36.8 cm、有限要素法：40.2 cm、上弦材 (中央点) の軸力：差分法 45.7 t、有限要素法 43.0 t、斜材 (中央) の軸力：差分法 -188.4 t、有限要素法 -71.6 t であった。1/15 のモデルテストを実施して

図11 軸組図とユニットの詳細²⁾

解析精度を検討しているが、モデル実験から得られた中央点の変位は 37.38 cm (換算値) となっており、解析との差は 3 % に過ぎなかった。なお、ボルト接合部の実験と施工時に変位と歪の測定を実施しており、その結果は文献 2) にまとめられている。

次に、上海文化広場屋根について述べる。この名前からわかるように、もともとは野外の劇場であった。1972 年、図 12 の 3 方向グリッドをもつ平板型スペースフレームがかけられた。グリッドは 1 辺が 6.28 m の 3 角形で、高さは 5 m である。部材としてはパイプを利用し、その径および厚さは、上弦材 $\phi 121 \times 10$ 、下弦材 $\phi 114 \times 8$ 、斜材 $\phi 159 \times 6$ であり、使用した鋼材量は 45 kg/m² であった。節合部には球ジョイントを用い、部材を溶接している。地上で組み立て、リフトアップ工法を用いて施工している。図 12 の太い黒線で囲んだ部分がリフトアップし

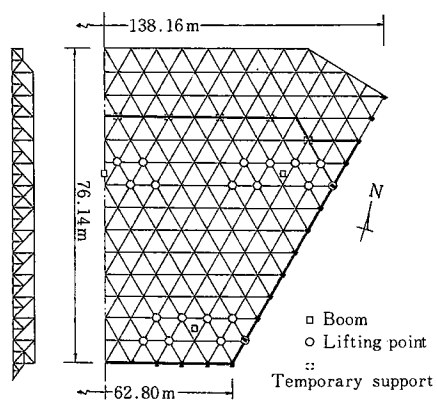
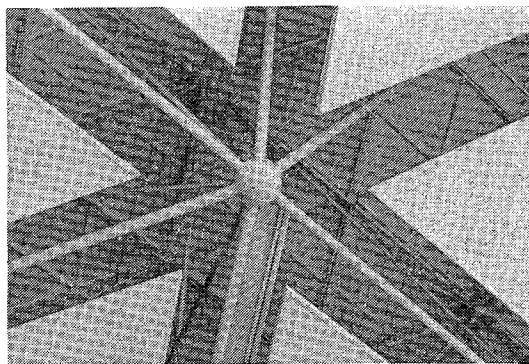
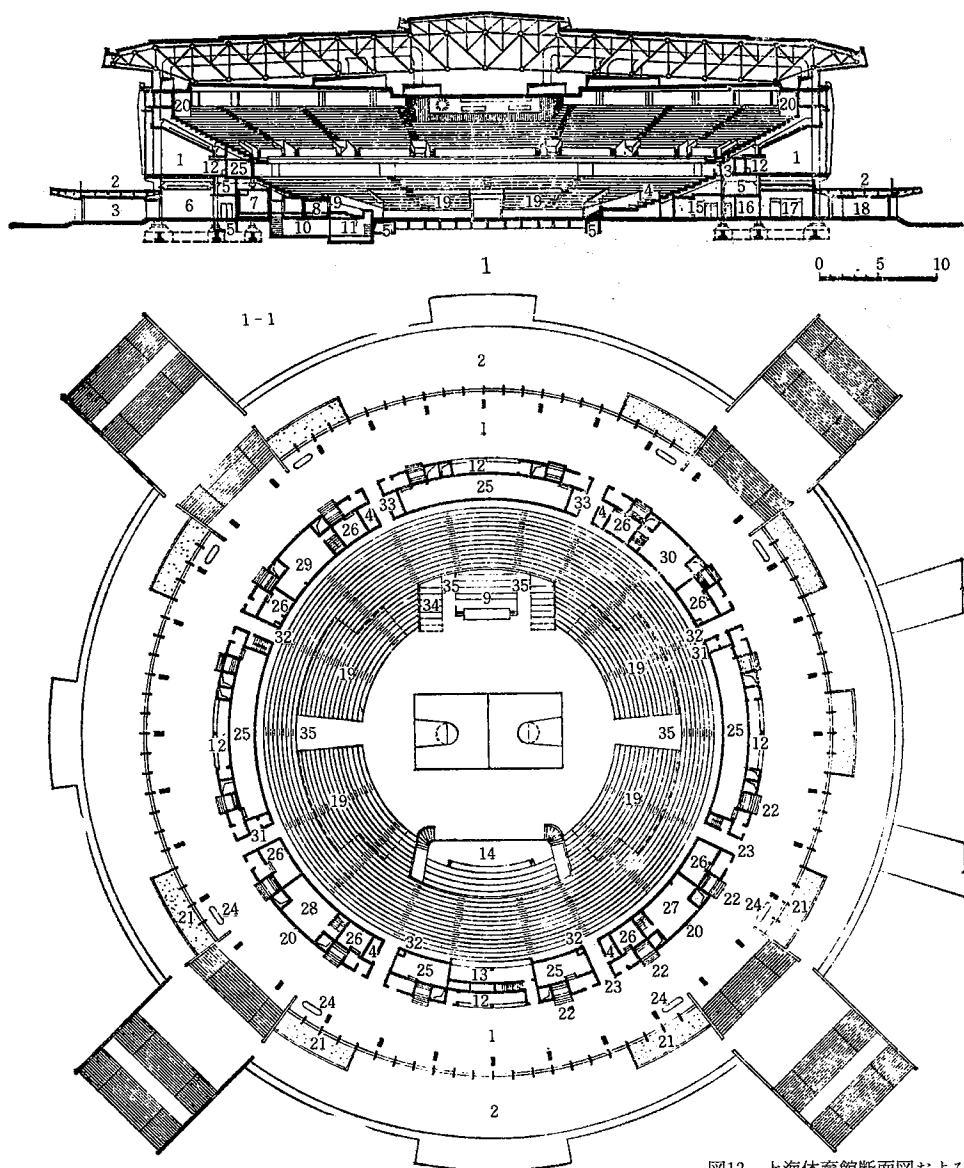
図12 上海文化広場屋根の軸組図⁹⁾

写真5 球ジョイント

図13 上海体育館断面図および平面図⁹⁾

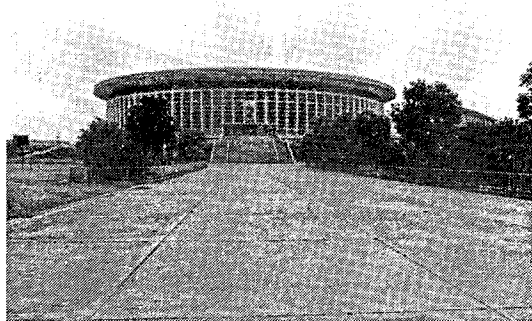


写真 6 上海体育館外観

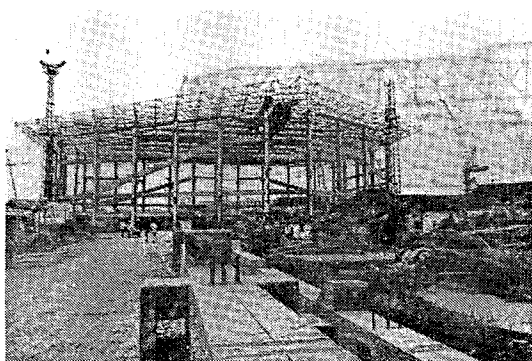


写真 7 建設中の上海遊泳館

た部分で、260 t の重量がある。等価剛性を持つ梁としての解法については、文献 9) に詳細に述べられている。この平板型の立体トラスは、端部の剛性がグリッド部の剛性に比して小さく (3 辺では $1/4.3$, 他の 1 辺で $1/16.7$)、この影響を解析的に検討している。最大たわみを、 230 kg/m^2 の設計荷重を受ける場合について、解析結果、モデル実験、実測値を比較すると、43.4 cm, 39.8 cm, 31.3 cm となっている。

この建物の構造計画は、1975 年に建設された上海体育館 (110 m の直径をもつ円形の体育館、図 13) や現在建設中の上海遊泳館に踏襲されている。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、中国建築科学研究院 何广乾博士、同 張維岳氏、北京市建築設計院 郁彦氏、同济大学 李国豪、徐植信、将通の各先生には資料の提供、現場の案内などで大変お世話になりました。深く感謝いたします。特に、何广乾博士にはすべての段取りをしていただきました。お礼申し上げます。

(1982 年 9 月 10 日受理)

参 考 文 献

- 1) 太田静六「眼鏡橋、日本と西洋の古橋」理工図書、1980
- 2) Tang Peiwei 「Design of the Space-Trussing Roof for the Capital Gymnasium」, the Beijing Architectural Design Institute, 1982
- 3) Max Irvine, H. 「Cable Structures」, The MIT Press, 1981
- 4) 北京市建築設計院「体育建築設計」, 中国建築工業出版社, 1981
- 5) Huang Chia-Hua, Hwu Ren-Mo, Yue Tsai-Tao and Feng Chih-Chun 「the Design and Construction of the Student's Dining Hall of Tung-Chi University」, Bulletin of the International Association for Shell Structures, No. 16, 1960
- 6) Yu Jia-Xi and Yu Yen 「Circular Double Layer Suspended-Cable Roof Structure」, the Beijing Architectural Design Institute, 1982
- 7) 浙江省工業設計院, 浙江省基建局第一工程处, 国家建委建築科学研究院, 「鞍型の吊り屋根構造を採用した浙江人民体育館」
- 8) 日本鋼構造協会編, 「吊構造」, コロナ社, 1975
- 9) 徐植信, 曹菊王, 故学仁, 「The Stress Analysis of Three-Way Truss Grids」, Scientia Sinica, Vol. XVI, No. 2, 1973

