テンセグリック・システム により補剛された薄肉ドーム の提案

阿部 優 ———*1
立道郁生 ———*2
川口 衛 ———*3

THIN-WALLED DOMES STIFFENED BY TENSEGRIC SYSTEMS

Masaru ABE
Ikuro TATEMACHI
Mamoru KAWAGUCHI

A new structural system in which a thin-walled domical structure is stiffened by a tensegric structural system is presented. The new system shows an increased buckling capacity and a decreased burden on the boundary structure. Loading tests on models proved the above advantages of the proposed structural system experimentally. The system has also been applied to a full-size dome of 35 m in diameters. Static tests carried out on the building have proved the effectiveness of prestressing in the system. Dynamic characteristics of the real dome have been obtained by vibration tests.

キーワード：
テンセグリック・システム, 薄肉ドーム, ケーブル, 座屈, 載荷実験, 振動実験,
単層ラチスシェル

Keyword:
tensegric system, thin-walled dome, cable, buckling, loading test, vibration
test, single-layer reticular shell

1 序

薄肉ドームが持つ力学的有利さを引き出して、軽くて強い構造物を造りだそうとする試みは、鉄骨トラスドームを初めとして古くから行われている。また、近年では大規模なドーム構造物の建設が試みられているが、膜応力場としての薄肉ドームの有効性は、ドームの安定性能の確保や、境界構造の健全性の確保にあり、特に、境界構造に対する負担の減少にかかっていると云ってよい。

この問題に対する古典的な解決策として、高ライズ化により境界構造に対するスラストを低減する方法がある。また、鉄骨トラスの複層化により曲げ剛性を付加する方法は、アストロドーム(1965年)など多く試みられてきた。複層トラスドームは比較的高い安定性能が得られるものの、鉄骨重量が大で外周境界リングには大きな引張力が生じるなど、軽量化の観点から現在でも改良が望まれている。

他方、新しい解決方法として空気膜構造やケーブルドームなどのテンション構造の利用がある。近年注目されているケーブルドームはテンセグリック・システムとしての利点はあるものの、一般に応力の伝達経路が長くフレキシブルな構造であるため、安定化のために大きなプレストレスが必要であり、ケーブル以外の構造要素に及ぼす影響が大である。特にドーム外周境界リングは著しく大きな圧縮力が生ずるため、建設コストに大きな負担となっている。

これらの観点から、薄肉ドームの安定性能の確保や境界構造の負担の軽減に対する新たな解決策として、薄肉ドームをテンセグリック・システムにより補剛した構造システムを提案する(図1)。

本報告では、薄肉ドームの一つの典型として、単層トラスドームを具体的な対象とする。単層トラスドームは今日の空間構造の要件である軽量化が計れるものの、安定性能の確保や予見に課題があることから大規模な空間構造に適用することに困難さが伴っている。

本構造システムの特徴は、テンセグリック・システムの合成による応力と変形の制御にあり、外周リングに生ずる応力を軽減させると共に、ケーブルドームのような過度のフレキシビリティを回避し、さらに単層トラスドームの座屈耐力の増大が期待でき、単層トラスドームでは従来困難であった大スパン低ライズドームの建設を、安全で経済的に行うことができることである。

本報告では、まず提案構造システムの概要と基本的な力学特性を

図1 薄肉ドームとテンセグリック・システムの複合

*1 法政大学工学部建築学科 講師・工修

*2 前田建設工業(株) 特殊構造部課長代理・工修

*3 法政大学工学部建築学科 教授・工博

*1 Lecturer, Dept. of Architecture, College of Engineering, Hosei Univ., M. Eng.

*2 Deputy Manager, Advanced Structural Engineering Dept., MAEDA Corporation, M. Eng.

*3 Prof., Dept. of Architecture, College of Engineering, Univ. of Hosei, Dr. Eng.

示し、さらに原理模型および実大建物を用いた载荷実験、振動実験結果を報告し、本構造システムの有用性を実証する。

2 提案構造システム

2.1 提案システムの構成

提案構造は単層トラスドーム部と束材（ストラット）及びケーブル部から構成される（図2）。単層トラスドーム部に吊り下げられるストラットには、放射方向にのびるケーブル（放射ケーブル）とリング状に閉じるケーブル（フープケーブル）が緊結されている。これらのケーブルに適度なプレストレスを導入することによってドーム全体のスラストが軽減し、外周境界リングを初めとする単層ドーム部材の応力が著しく減少する。さらに、積雪等の付加荷重に対してもケーブルには付加張力が有効に発生し、部材応力や変位の増加を低減することができる。また、提案構造の形状は、円形平面だけでなく楕円状平面を有する構造物等にも適用可能である。

図2 提案構造システムの構成

2.2 線形解析による構造特性

ここでは直径 200 m のドームの試設計を例にその構造特性を示す。単層トラスドーム部は球形でライズ/スパン比 0.15、屋根仕上げは金属板程度としている。ドームの境界条件は、放射方向フリー、円周方向ピン支持とし、下部構造に対する温度応力の影響を解放している。ケーブルのプレストレスは長期鉛直荷重時に外周境界リングの軸力が最小（当然、放射方向の変位も最小）となることを目標に設定している。

図3 提案構造システムの試設計モデル

長期鉛直荷重（表面積当たり 1.47 kN/m^2 ）に対する有限要素法を用いた線形解析結果を以下に示す。参考のため、単層トラスドーム（提案ドームからテンセグリック・システムを除去したものを指す）の結果もあわせて示す。

図4は外周境界リングを含む円周方向のトラス材の軸力を示すが、単層トラスドームの外周境界リングの大きなテンション（約 11

MN）に比して、提案構造ではこれをキャンセルすることが可能であり、プレストレス無しの場合でもケーブル系には付加張力が生じ、本試算ではこのリング張力を 1/3 程度に軽減できることが確かめられる。また、図5に示すように、単層トラスドーム部の放射方向トラス部材の軸力も最外周部では半減している。

図4 円周方向トラス材の軸力

図5 放射方向トラス材の軸力

2.3 ケーブル剛性と付加張力

積雪等の付加荷重により、ケーブルには付加張力が生じるが、他方、ケーブルの補剛効果は単層トラスドーム部とケーブルの剛性比に関係すると思われる。ここではケーブルの軸剛性をパラメータとして付加張力の変化を見てみることにする（但し、検討モデルは直径 50 m の小規模モデルで行う）。

図6はプレストレス無しの場合における放射ケーブルの付加張力とケーブル剛性の関係を示している（荷重は長期鉛直荷重 980 N/m^2 ）。なお、図中の「最適張力」とは長期鉛直荷重に対し外周境界リングの軸力が0となるために必要なケーブル張力を指す。この図より、ケーブル剛性を増せば付加張力も増加するが、過度の剛性増加は効果的ではないと云える。また、図示していないが、放射ケーブルの勾配が大きい程付加張力は入りやすくなる傾向も得られている。

付加荷重に対して、どのような補剛効果を期待するかは個々の設計条件で異なるが、最適な効果を得るためにはケーブルの剛性およ

図6 ケーブル軸剛性と付加張力

び形態について考慮する必要がある。

3 原理模型による載荷実験

3.1 実験の目的

ここでは提案ドームの座屈安性能、座屈モードを原理模型を用いた載荷実験により確認する。

3.2 模型実験概要

3.2.1 試験体概要

試験体は球形ドームとし、単層トラスドーム部のスパンは 3.0 m、ライズは 0.45 m (ライズ/スパン比 0.15) としている。試験体の質量は約 250 kg である。写真 1 に試験体の概要を示す。

図 7 に示すように、単層トラス部材およびストラットには真鍮パイプ ($\phi 12 \times 3$)、外周境界リングには真鍮製丸棒 ($\phi 14$) を使用している。各トラス部材は軟鋼製の接合ネジ (M 8) を介して外周を球面加工されたノード (節点) に緊結している。ドームの支承部には放射方向ローラー、円周方向ピンの支持条件を考慮し、フラットローラーを採用している。

試験体は提案ドーム 2 体および単層トラスドーム 1 体とし、各試験体の組立精度 (初期不整) は、頂部高さおよび節点間距離とも完全形の 1% 以内に収まっている。

また、試験体に使用している各材料の軸方向弾性係数 (平均値) は、真鍮材で 1.00×10^5 MPa、軟鋼で 2.10×10^5 MPa である。なお、同時に行った接合部の単純曲げ試験より、約 $1.5 \text{ kN} \cdot \text{cm}$ を超えると M 8 ネジ部の曲げ降伏が卓越することが確かめられている。

写真 1 構造模型全景

図 7 構造模型の概要

3.2.2 載荷および測定方法

載荷はオイルジャッキによる荷重制御とし、トーナメント方式により、支配面積に比例するように各節点に分配している。

節点変位および支承部の放射方向変位はワイヤーを介して、摺動式変位計 (感度 $1/100 \text{ mm}$) により、また、各部材の軸ひずみをひずみゲージにより各載荷ステップ毎に計測している。

図 8 載荷装置概要

3.3 模型実験結果

3.3.1 提案ドームの破壊状態

弾性範囲での載荷実験を行った後、破壊に達するまで荷重を漸増した。図 9 に頂部節点群の荷重変位曲線を示すが、総荷重が 50 kN 付近から頂部の圧縮リングが面外方向に鞍型状に変化し始め、その後突然、破壊に至っている。破壊荷重はそれぞれ 93.2 kN, 108.9 kN である。

破壊後の観察によると、写真 2 に示すように、全周の約 $1/4$ の領域で外周から 1 つ内側に入った節点の大きな回転変形と、放射方向部材の接合ネジの曲げ降伏が確認されている。図 10 に、最大荷重時および破壊後の鉛直変位分布を示すが、破壊後の変位モードは、外周から 2 つ内側に入った節点が陥没し、除荷後の計測によれば、最大変位は 36.2 mm および 38.0 mm となっている。

この実験からだけでは精査できないが、最外周のケーブルとストラットには、載荷と共に大きな付加軸力が発生し、単層トラスドーム部を突き上げているが、ケーブルの角度の関係上、内側の部分のこれらの効果による突き上げが小さいため、荷重の増加に伴い内側の節点変位が進展し、頂部の鞍型の変位モードとの干渉により、片

図 9 荷重-変形曲線
(提案ドーム試験体)

写真 2 破壊後の状況
(提案ドーム試験体)

図 10 提案ドームの鉛直変位分布

側が陥没したものと推測される。

3.3.2 単層トラスドームの破壊状態

図11に単層トラスドームの荷重変位曲線を示すが、総荷重30kN近傍から提案ドーム同様に、頂部に鞍型の変形が発生し、60.8kNで座屈破壊が生じた。この座屈は瞬間的に起き、その際、支承部が急激に回転し、フラットローラーは外側に跳ね出している。また、陥没部近傍の接合ネジおよび放射方向材は面外下方に大きく曲げ降伏しているのが確認されている。実験後に計測した鉛直変位分布を図12に示すが、陥没範囲は、提案ドームよりも外側となっており、最大変位も157.0mmと極めて大きい値が計測されている。

図11 荷重-変形曲線
(単層トラスドーム)

図12 破壊後の鉛直変位分布
(単層トラスドーム)

3.3.3 提案ドームの安定性能

実験の結果、図13に示すように各試験体とも放射方向材の軸力は最大荷重に至るまで、ほぼ線形性を保っているが、曲げモーメントは60kNを超えると強い非線形性状を呈し(図14)、最終段階では、陥没部近傍の接合ネジ(M8)に曲げ降伏が生じたと推測される。

提案ドームでは、ケーブル系の補剛効果により、トラス軸力の増加が少ないため、座屈荷重が単層トラスドームを上回ったことは明らかである。本実験の結果では、提案ドームの耐力は単層トラスドームの1.5~1.8倍程度あることが確認された。

また、破壊箇所は、単層トラスドームではドーム裾部であったが、提案ドームでは最外周のテンセグリック・システムの補剛効果により、ドーム中央部側にシフトする特徴が明らかになった。

図13 放射方向トラス材の
軸力増分図

図14 放射方向トラス材の
曲げモーメント増分図

図15 荷重変形曲線の比較

4 実大建物による非破壊実験

4.1 実験の目的

模型実験による座屈安定性の確認に引き続き、実際のスケールの接合部や仕上げ材を持つ実規模ドームを対象に、

① 載荷実験により、付加荷重に対する各構造要素の挙動を測定し、想定した構造特性の確認

② 振動実験により、提案ドーム構造の振動特性について基本的なデータの収集

を主目的とし、併せて張力導入等の施工性を検討することを目的とする。

4.2 実大建物の構造概要

対象とする建物は、本提案構造システムを採用した屋内体育施設で、1994年3月に竣工している(写真3)。屋根架構は図16に示すようにH型鋼を主材とするスパン35mの単層トラスドームを最外周部のみにテンセグリック・システム(ケーブルおよびストラット)により補剛したもので、地上最高高さ14m、屋根部の総質量約130tonである。この構造では放射ケーブルとしてPC鋼棒を使用している(以下放射ロッドと呼ぶ)。また、ドームはV字状の鉄骨柱(柱頭・柱脚とも放射方向ピン)で支持し、提案ドームの拘束条件(放射方向ローラー)を確保している。その他、主な屋根諸元としては、鋼板仕上げ、中央部天窓(ガラス)の採用などである。

写真3 実大建物全景

図16 実大建物の概要

4.3 ケーブル緊張工事

ここでは、原理模型と異なり施工性を考慮して、ストラットを伸長することによりケーブルに張力導入出来る機構(写真4)を採用している。これは、ケーブルをストラット側に引き込んで張力導入する方式に比べ、小さな力での張力導入が可能であるばかりか、ケーブルを定着する必要もなく、有効な方式である。

図17は張力導入時の放射ロッドの軸力測定値と解析による目標張力を示しているが、ばらつきの少ない結果で張力導入が行われた。

写真4 ケーブル接合部

図17 放射ロッドのプレストレス導入

するテンセグリック・システムの補剛効果は顕著ではない。しかし、実験中、プレストレスをキャンセルするようなゆりみは生じておらず、提案ドームの偏荷重時における耐荷性能についても確認できた。

図18 放射ロッドの付加張力

図19 接合部の鉛直変位

図20 長外周放射トラス材の軸力分布

図21 放射ロッドの付加張力分布

4.4 静的荷重実験

4.4.1 荷重方法等

荷重は、建物床部（土間コンクリート）とドーム節点に取り付けた吊り滑車に通したワイヤーロープをチルホールジャッキで引き込む方法で行っている(写真5)。荷重分布パターンは全面および半面の2パターンとし、最大荷重荷重は、短期設計用の積雪荷重に対応する 588 N/m^2 とした（全面荷重パターンの場合、総荷重量は 490 kN となる）。

写真5 荷重実験装置

4.4.2 全面荷重実験

実験結果の中、放射ロッドの付加張力およびケーブル系で補剛された節点（外周より1周内側）の鉛直変位を解析値と共に図18、図19に示すが、変位に多少のばらつきが認められる程度で、概ね、解析値に一致しており、期待されたテンセグリック・システムの突き上げ効果が確認出来たといえる。なお、除荷過程に生じている変位や張力の残留現象は、荷重システムとして採用しているケーブル系に原因があると推測される。

4.4.3 半面荷重実験

実験結果の中、最外周放射トラス材および放射ロッドの最大荷重時軸力分布を図20～21に示すが、解析で予測したとおり、荷重側の荷重を境界に伝達するために生じる面内せん断分布と一致した結果を示している。なお、放射ロッドの付加張力結果は解析値と比べ低めの値を示しているが、これは、接合部のディテールによるもので、実施設計に際して解決可能である。

また、半面荷重時における放射ロッドの付加張力量は半面荷重荷重を均した全面荷重荷重分に相当しており、荷重の逆対称成分に対

4.5 振動実験

4.5.1 実験概要

本実験では図22に示すように、2台の加振機をドーム上に設置し、同位相と逆位相に加振することにより、軸対称および逆対称モードの励起を可能にしている。なお、加振方向、加速度測定ともに鉛直方向のみとしている。また、提案ドームの振動実験の他、提案ドームのケーブル材を緩めた状態で単層トラスドーム構造を実現

図22 加振システム概要

し、同様の振動実験を行っている。

振動実験としては、定常加振実験および自由振動実験を行い、それぞれの結果から固有値および減衰定数を同定している。自由振動実験は加振機の急停止により行い、自由振動波形の包絡線を指数近似減衰定数を推定している。

4.5.2 実験結果

図23は同位相加振の結果を、節点変位の振幅を加振力で基準化した共振曲線で示す。また、図24、図25に固有振動数およびモードの実験値を有限要素法による解析値と比較して示す。ここで、解析ではトラス材は梁要素とし、質量は各節点に集中して与えている。

図より、1次モードはドーム中央部の逆位相モードとなっている。しかし、ドーム中央部は、遮光ルーバーなどの機器類や架台が設置されているために質量が集中していること、およびこのモードは減衰効果が高く、応答倍率が小さいことから、2次以降が主要なモードと推定される。

上図より、提案ドームの振動性状を単層トラスドームと比較すると、対称モード(2次、5次)の振動数が5%程度高くなっている他は、モードを含め顕著な差異は見られない。この対称モードの振動数は、実大モデルのケーブル剛性とトラス材剛性ととの比が1/8であることを考慮すると、ケーブル材による補剛効果が反映された結果といえる。

自由振動波形と共振曲線から推定した減衰定数は、各モードとも概ね、提案ドームで1.0~1.5%程度、単層トラスドームで1.5~2.5%程度との結果を得ている。

5 結 語

本報告では薄肉ドームの安定性能の確保や境界構造に対する負担の減少に対する新たな解決策として、薄肉ドームをテンセグリック

ク・システムで補剛した構造システムを提案した。

本構造システムによれば、外周境界リングの負担をキャンセルすることが可能であり、さらにトラス部材に生ずる応力を軽減できることを示した。また、原理模型実験により本提案システムの座屈安定性に対する優位性を示し、実大建物をを用いた載荷実験によりケーブルの付加張力導入の有効性を実証した。加えて、同実大建物における振動実験結果より、提案構造の基本的な振動特性を把握することが出来た。

薄肉ドームとテンセグリック・システムからなる本システムは、単に「圧縮構造+引張構造」という捉え方より、むしろ一種のプレストレス構造という見方が成り立つ。すなわち、剛性を提供する部分と、力を提供する部分の合成構造なのである。単層トラスドーム部分は簡単に安く空間を覆うことができ広義には高い剛性を持っているが、座屈安定性に問題がある。他方、ケーブルは非常に剛性は小さいが、大きな張力を与えることができ、単層トラスドームに対して力を提供することになる。単層トラスドームの座屈現象は、防止し難い非線形挙動として顕著な例であるが、これを避ける構造システムとしてテンセグリック・システムにより補剛した本提案ドームは極めて有用であるといえる。

謝 辞

本提案システムを「サスペン・ドームの開発」と題して一連の開発を行っている畑戸龍夫氏、藤原智氏、安間由倫氏を始めとする前田建設工業(株)の方々にご多大なご協力を頂きました。ここに、深く謝意を表します。

参考文献

- 1) Kawaguchi, M. et al: On A Structural System "SUSPEN-DOME", IASS 1993 Istanbul, pp. 523~530, 1993.5
- 2) Kawaguchi, M. et al: Structural Tests of "SUSPEN-DOME" system, ASCE-IASS 1994 Atlanta, pp. 383~392, 1994.5
- 3) 樋口虎一, 加藤史郎: 張弦材を有するスペースフレームの基礎的構造特性に関する研究, 日本建築学会大会梗概集 (関東), pp. 1317~1318, 1993.9
- 4) 樋口虎一, 加藤史郎: 張弦材を有するスペースフレームの振動性状に関する研究, 日本建築学会大会梗概集 (東海), pp. 1915~1916, 1994.9

[1995年6月22日原稿受理 1995年8月25日採用決定]

図23 共振曲線(同位相加振)

実験			解析		
次数	周波数 (Hz)	モード図	次数	周波数 (Hz)	モード図
1	5.40		1	4.86	
2	5.92		2	5.61	
3	6.80		3	6.16	
4	7.20		5	7.02	
5	8.30		6	8.23	
					解析/実験
					0.90
					0.95
					0.91
					0.98
					0.99

図24 提案ドームの固有値

実験			解析		
次数	周波数 (Hz)	モード図	次数	周波数 (Hz)	モード図
1	5.40		1	4.86	
2	5.92		2	5.31	
3	6.80		3	6.14	
4	7.20		5	6.88	
5	8.30		6	7.56	
					解析/実験
					0.90
					0.91
					0.90
					0.91
					0.96

図25 単層トラスドームの固有値