

氏名	さ はし のぶ お 佐 橋 睦 雄
授与学位	博士(工学)
学位授与年月	平成9年7月9日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和47年3月25日 名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻修士課程 修了
学位論文題目	大規模単層ラチスドームの不整に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 山田大彦 東北大学教授 柴田明德 東北大学教授 三橋博三 東京大学教授 半谷裕彦

論 文 内 容 要 旨

1963年ブカレストに建設されたスパン9.3mの単層ラチスドームが翌1963年座屈崩壊した事故を契機に、鉄骨造の大空間構造物は、比較的小規模な場合を除き、複層ラチス形式とすることが一般的であった。その後の研究により、単層ラチスドームの座屈現象には部材座屈のほかシェル座屈のような全体座屈もあること、全体座屈耐力は載荷に伴う面外変形の影響を受けるほか形状不整の影響を極めて敏感に受けること、また全体座屈の検討には架構全体の変形性状を解析的に検討する必要があることなどが、明らかにされてきている。

しかし設計に際し、既往の研究成果を踏まえかつ対象建物に固有の条件を考慮して全体座屈耐力を評価することは、極めて困難であった。

梁形式の大空間構造の場合は、用途上、変位を小さく押さえるように断面設定され、常時荷重に対する部材応力度にはむしろ余裕があることが多い。一方、シェル構造の場合、部材の軸力が卓越し、変形の小さい架構となる。そのため、大空間構造はシェル構造で計画されることが多く、断面は応力算定結果に基づいて決定されることが多い。

複層ラチスドームも、また単層ラチスドームもシェル構造の特性を有する構造形式であるが、両構造の構造上の基本的な違いは、面外剛性の大きさにある。複層形式では、単層形式に比べて面外剛性が30～10倍と大きいので、全体座屈が安全上の問題とはなりにくい。一方、単層形式では、部材の応力検討に先だち、全体座屈耐力の検討が必要となる。更に、単層形式では、ラチス分割方法、境界条件、荷重分布、架構の変形など様々な要因により、ラチス部材に直接曲げモーメントが発生する。そのため、単層形式の場合、軸力と曲げモーメントを同時に受ける部材応力設計が必要となるが、全体座屈に大きな影響を与える形状不整が部材応力にも影響することが考えられる。

従来、単層ラチスドームに関する研究では、荷重の偏在や形状不整を考慮して最小の座

屈耐力を評価することに重点が置かれてきた。そのために、最も影響が大きい形状不整として、座屈モードをその分布形とする手法が多く採用されてきている。一方、部材応力に対する形状不整の影響を検討しようとするれば、形状不整の分布そのものが問題となる。更に、不整には、形状不整だけではなく、応力に直接影響する残留応力などの応力不整も考えられる。このように、不整をどう設定するかによって、単層ラチスドームの応力評価は大きく変わるものと考えられる。しかし、形状不整あるいは応力不整の発生要因あるいは発生メカニズムに関する研究も、またそれらの部材応力に対する影響の研究も、従来行われていない。

本論文は、このような現状と研究の経緯の中で世界的にも実施例がないスパン187.2mの大規模単層ラチスドームを建設するにあたり、施工に伴う形状不整および応力不整の分布と大きさに関する評価手法を提案し、部材応力および全体座屈耐力に対する不整の影響を解析し、実測と比較して検証した成果を取り纏めたものである。以下に各章の内容と得られた知見を要約する。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的およびその意義を明らかにした。

第2章「研究対象とする大規模単層ラチスドームの概要」では、本研究の対象建物であるナゴヤドームの構造概要、単層ラチスドーム構造屋根採用の理由および設計・施工にあたって解決すべき問題点を示した。

具体的な研究項目として次の5項目をあげた。

- (1)不整が部材応力、部材耐力および全体座屈耐力に与える影響
 - (2)実構造物における形状不整の発生に関する簡便な予測
 - (3)施工に伴う不整の解析
 - (4)施工に伴う不整の部材応力、部材耐力および全体座屈耐力に対する影響
 - (5)施工期間中の実測結果と不整を考慮した解析結果との対応
- 上記(1)と(2)は、大規模単層ラチスドームを対象とした解析的検討で、続く(3)と(4)の基礎をなすものである。(2)、(3)および(4)は、本論文で初めて扱われる研究であり、(5)はそれらの検証である。

第3章「大規模単層ラチスドーム構造の力学特性」では、上記2章の(1)に示した不整の影響が、単層ラチスドームの規模、ライズ比、ラチス分割法および荷重分布をパラメータとして、座屈耐力、部材応力および部材耐力に対する不整の影響を解析し、不整の影響の特性を明らかにした。

スパンについて100m、150m、183.2mの3種類、ライズ比について0.162と0.2の2種類を組合せて検討した。ラチス分割法については、実際に採用した球面分離モデル(A)と従来の研究対象である球面モデル(B)とを検討した。荷重条件としては、等分布荷重(全載および半載)と集中荷重のある場合とを検討した。

以上の検討結果に基づき、以下の知見を得た。

- 1) 全体座屈に大きな影響を与える形状不整は、部材応力および部材耐力にも大きく影響し、部材設計時においても形状不整の影響を適切に評価する必要がある。その意味で、全体座屈耐力に対する形状不整の影響を評価する際に一般的に用いられてきた座屈モードを形状不整の分布形とする研究の手法は、部材設計に対しては現実的ではなく、また不合理である。
- 2) 検討した実現可能なモデルの範囲では、弾性限荷重が全体座屈荷重に対して $1/3 \sim 1/2$ であり、部材降伏または部材の座屈が全体座屈に先行する。

以上の考察に基づき、実構造物における形状不整の発生メカニズムに起因する不整の分布と大きさおよび部材耐力への影響を考慮することが、安全性の評価および合理的設計に不可欠であると結論した。

第4章「形状不整の発生に関する簡便な予測」では、不整の発生要因を分析するとともに、不整としての座標誤差に注目し、対象とする大規模単層ラチスドームの設計段階における簡便な推定法を提案し、その適用性を検討した。

以上の検討結果に基づき、以下の知見を得た。

- 1) 簡便な推定法によれば、施工に伴って発生する座標誤差は、発生要因を独立と仮定して単純合計すると、 $15\text{ cm} \sim 30\text{ cm}$ となる。従来最小の全体座屈耐力を評価するために採用されてきた形状不整の大きさは、約 50 cm と推定されるが、この値は、明らかに過大評価である。また、座標誤差を発生する要因は必ずしも独立ではなく、加工、施工段階で常に修正されるのもであることを考えると、簡便な評価法の結果そのものも過大であると予測される。しかし、実際にどのように修正されるか、またその分布がどのようになるかは、簡便な評価法では評価できない。
- 2) 単層ラチスドームに影響する主たる不整の発生要因は、①建方手順あるいは仮設条件に伴う荷重変動、②建方期間中の温度変化、③ブロック間の溶接接合である。これらは、建方の進行に伴い複合して不整を形成する。この不整は、形状不整ばかりではなく、部材応力に直接影響する応力不整ともなるが、これについて簡便な評価法は見あたらない。

以上の考察に基づき、施工のプロセスをシミュレートとした施工解析モデルを提案し、それを用いて施工に伴う形状不整および応力不整を、解析的に評価する必要があると結論した。

第5章「施工時に発生する不整の予測解析と影響評価」では、施工に伴う不整の解析については、設計時に想定した施工計画に基づいて不整の発生要因ごとに、次の解析を行って不整を評価する手法を提案した。

- ①建方手順と仮設条件を考慮した建方不整解析、
- ②施工期間中の温度変化を考慮した温度不整解析、
- ③溶接手順を考慮した溶接不整解析、

④上記①から③の結果を施工ステップごとに総合した施工不整解析、

提案した不整解析手法を研究対象とする大規模単層ラチスドームに適用して解析した結果から、以下の知見を得た。

- 1) 不整発生要因のなかでは、溶接の影響が最も大きい。
- 2) 施工期間中の温度変化の影響は、施工時期に応じて変化し、他の要因の影響に対して、加算側とも減算側ともなり得る。
- 3) 応力不整は、軸力より曲げモーメントに対して大きい。建方手順により個々の部材に対する影響は大きく変化するが、軸力および曲げモーメントに対して概ね±一定の軸力変動幅を与える。施工不整解析の結果として総合的に得られる応力不整は、長期応力度比に換算すると、最大影響部材で±0.2の変動幅に納まる。
- 4) 形状不整の分布と大きさを得た。形状不整の大きさは、 $-3.1\text{ cm} \sim +1.2\text{ cm}$ ($-0.15i \sim +0.05i$: i =部材平均断面二次半径) の範囲にある。

以上の解析に加えて、施工手順、仮設計画および温度条件の異なるモデルについても解析し、比較検討して以下の知見を得た。

- 1) 上記1)と2)に示した基本的特性に変化はない。
- 2) 形状不整の分布と大きさは、大きく変化する。
- 3) 応力不整および形状不整の大きさともに、上記の結果の約50%増しとなるが、これは、温度変化を高く設定したことと、支持バント数を減らしたことによる。
- 4) 不整に対する支持バント数の影響は大きく、不整は、支持バントの数が多いほど小さくなる。

以上の知見を総合することにより、研究対象とする大規模単層ラチスドームにおいては、施工に伴う応力不整が大きく、形状不整はむしろ小さいことを結論した。

以上の具体的な単層ラチスドームの不整に関する知見は、本論文によって初めて得られたものである。

第6章「施工時実測結果とその分析」では、第2章に示した単層ラチスドームについて、組立→地切→リフトアップ→完成の工程を通して計測した変位および応力の時系列を示すとともに、第5章で提案した施工不整解析により予測した時系列とを比較検討し、本解析手法の妥当性と有効性を検証した。

比較検討した項目は、1)組立期間中の部材応力変動、2)地切施工時の吊点反力および変位挙動、3)地切完了時のテンションリングの水平変位と回転および頂点変位、4)完成後の部材軸力分布の、4項目である。これらについて、日々進行する実施工とそれをステップ状にした解析モデルとの差に起因する若干のばらつきはあるものの、実測結果と施工不整解析結果とはよく対応することを明らかにした。なお、不整を無視した完全系に対する解析では、実測結果を説明できないことを併せて明らかにした。

以上の比較検討の結果、設計上必要な精度をもって不整とその影響を評価できることが

明らかとなり、本解析手法が妥当でありかつ有効であると結論した。

第7章「結論」では、本論文を総括し、施工不整解析の妥当性と有効性を明らかにし得たことを踏まえ、大規模単層ラチスドームの合理的な設計に基づいた実現が可能であると結論した。

以上、本論文では、大規模単層ラチスドームについて、建物個別的条件を考慮した不整の解析および評価手法を提案することにより、その合理的な設計への道を拓くことができた。技術の進歩とともに高度に専門化し分業化した現代においても、大規模化し多用途化する大空間構造を実現する上で、どう設計するかは勿論のこと、どう建設するかをも考慮した総合的視野に立った設計が、最終的な建物品質を確かなものにするために重要である。

本論文で展開した手法の基本的な考え方と解析の方法は、実現に際して不整の評価を必要とする他の構造に対しても適用可能であり、またどう建設するかの検討にも応用可能である。今後の新たな発展的応用と普及が期待される。

審査結果の要旨

大規模単層ラチスドームの実現が注目される今日、その不整の評価と設計への反映の手法の開発が望まれている。しかし従来、規模の大小によらず、不整の振幅と分布の評価なしに構造耐力を評価せざるを得ず、合理的な構造の設計が行いがたい状況にあった。

本論文は、不整の簡易評価手法及び詳細評価手法を新たに提案し、実際に応用して、施工期間中の計測データに基づいて手法の妥当性と有用性を明らかにしたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、研究対象とした大規模単層ラチスドームの概要を示し、本論文で研究する不整に関する項目を明らかにしている。

第3章では、形状不整の振幅と分布の仮定を前提とする従来の研究手法を用い、規模、ライズ、ネットワーク分割及び荷重の分布など、この手法の範囲で可能な要因の構造耐力に及ぼす影響を明らかにしている。その結果、仮定と実際との対応が不明確であり応力不整の影響を検討できないこと及び特に大規模な構造では部材応力に対する影響も大きく設計・施工上の不合理性を免れ得ないことを指摘した。

第4章では、素材の生産、工場製作及び現場製作・組立に際して適用される管理上の判定基準に基づいて、発生し得る不整の評価項目を検討し、整理している。その結果、適用した簡便な方法で形状不整の大まかな評価が可能であるが、応力不整の評価は行えないことを明らかにした。更に、施工過程における組立状況の変化、気温の変動及びブロック間の突合せ溶接に伴う縮みが、形状不整及び応力不整の主要な発生要因であり、これらを明らかにするためには、施工のシミュレーションが不可欠であることを指摘した。以上は不整の評価に関する重要な知見である。

第5章では、前章までの成果を踏まえ、設計の段階で施工の方法と手順を確認してシミュレーションを行い不整を評価する手法を提案し、応用している。工程を構造上注目される節目を基に一連のステップにモデル化し、前章で結論した3つの主要因について逐次シミュレーションを実施することにより、それらの要因が不整の発生に及ぼす影響及びそれらの合成としての施工に伴う不整の分布と振幅を明らかにした。その結果、形状不整はむしろ小さいこと、許容応力度設計における応力不整の影響が重要であること、施工時期あるいは組立方法と手順により不整が変化すること及び溶接縮みによる不整が大きいことなどを明らかにした。以上は新しい有用な知見である。

第6章では、実現に際して計測した変形・応力と前章のシミュレーション結果を比較し、提案された不整の評価手法の妥当性と有用性を明らかにしている。特に地切り工程におけるテンションリングの上昇変位に関する予測は、工程管理に極めて有効であることが示されているが、これは施工をシミュレートした構造モデルによって初めて可能であると指摘している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、大規模単層ラチスドームの施工のシミュレーションに基づく新たな不整の評価手法を提案し、実際に適用して、不整の分布・振幅とその影響に関する貴重なデータを提供したもので、建築構造学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。