

論文の内容の要旨

論文題目 超長梁の衝撃軸圧縮挙動

氏 名 井手 和幸

宇宙空間において、太陽光発電やソーラーセイル、観測・通信用アンテナ等は特に高性能化のために大面積の受光面やリフレクタを必要とする。これらを実現する方法として、膜面またはメッシュを展開して利用するものや、モジュール化されたユニットを連結し巨大化する構造が考えられており、既にその一部は実証段階にある。膜面形状の維持やモジュール連結構造を保持するためには、梁などの構造部材によってそれらを支持しておくことが必要となるが、この際の梁の圧縮問題が大きな課題の一つとなる。これは、梁が圧縮力を受ける場合、一般に座屈荷重が梁長の二乗に反比例するため、先に挙げた例のように構造物が大規模になるほどこれらを構成する梁は座屈破壊を起こす危険性が大きくなるからである。

そこで本研究では、宇宙の大規模構造物での使用が想定される非常に長い梁（超長梁）の圧縮力伝達方法として、定常的な力の代わりに衝撃力を利用したパルス波を用いる手法を提案した。また、衝撃軸圧縮に対する超長梁の変形挙動についての理論的解析手法を開発し、さらに数值的、実験的に梁の挙動を考察した。

最初に、衝撃軸圧縮に対する梁の変形量解析についてまとめた。通常、圧縮力が梁全体にわたって負荷されるような短い梁についてはPulse buckling理論を適用することで梁に生じる最大変位を求めることができる。ところが、本研究のように発生する圧縮波が梁長に比して極めて短い場合、梁内部では被圧縮区間と非被圧縮区間とが混在し、梁全体を解析対象とすることは困難である。そのため、本研究では超長梁の長手方向に特定長の解析区間を連続的に設け、区間毎に二次元大たわみの梁理論を適用することで梁中の圧縮波伝播の影響を考慮した解析手法を提案した。本手法により、圧縮波長が梁全長より十分短い場合でも梁の変形を理論的に取り扱うことが可能となった。また、梁は様々な形状の梁固有の初期不整を有している。任意の初期不整形形状に対応するため、本研究ではフーリエ変換によって初期不整をモード分解し、モード毎の解析結果を示した。これにより、ある圧縮パルス波が梁に与えられた際、特定のモードが非常に大きな変形を引き起こすことが示され、そのモードは入力圧縮力および力積に依存して変化することが新たに示された。さらに、梁の最大変位量は梁に与えられた力積量が支配的なパラメータとなることが示され、変形量を初期不整の大きさ程度に抑えるための力積量の指標である特定力積量の概念が提案された。この特性力積量は梁のヤング率や密度等の材料特性から表わされ一意に決定されるため、超長梁へ負荷する圧縮力積量の目安を簡易に示す重要な指標となる。

次に、この問題に対して有限要素法による二次元弾性解析を行った。梁に加える

圧縮力や圧縮の時間を様々に変化させて超長梁に与え、生じる梁の変形量についてパラメトリック解析を行った。また、多様な初期不整形状を用意し、それぞれに対する解析を行った。その結果、圧縮力や圧縮時間を変化させても与えた力積量が同じ場合、梁は同様の最大変形量を示し、それらは理論解析によって予想された結果によく一致した。また、理論解析により示されていたモードにおいて想定通りの大きな変形が発生したことから、大変形を引き起こすモードの解析についても、その確からしさが示された。ただし、両解析はいずれも弾性範囲内で行われており、たとえば梁に負荷される圧縮力が圧縮降伏応力等の材料強度を超えて大きくなる場合には、座屈以外にこれらの影響を考慮する必要がある。

さらに、実験室レベルでの梁の衝撃軸圧縮問題の実験手法の提案が成された。宇宙大規模構造物への使用が想定される超長梁の問題について地上実験を行うにあたり、次の三点が問題となった。まず一点目は、実験室レベルの実験では取り扱える梁の長さが限られており、座屈荷重がそれ程低くならないという点である。このような梁に対して、加える圧縮力の大きさや圧縮時間を様々に制御しながら、座屈荷重を超える大圧縮を安定的に負荷することは困難である。二点目に、本研究では梁長に対して極めて短い圧縮波を発生させる必要があるが、構造部材に用いられる梁は一般に弾性速度が大きいため、これを達成することが困難となることである。また同時に、梁変形の観測も困難となる。三点目は、梁に加わる重力の影響を排除しなければならないことである。そこで、一、二点目の問題に関しては巨視的な縦弾性率が小さいペーパーハニカムコアを梁の材質に用いることで解決し、三点目は梁を懸架することによって対処した。梁の変形量は高速度カメラで撮影された画像を解析することによって得られた。梁に負荷された圧縮と梁の変形量とを詳細に解析すると、梁の変形量は圧縮力や圧縮時間ではなく与えられた力積量によって支配されることが確認された。また、特定のモードで大きく変形が発生することが示され、これらは理論解析によって得られた結果と同様の傾向を示した。ここで、梁の初期形状は非常に複雑であり、また実験を行う度にその形状は変化することから、任意の初期不整形状に対して、提案された理論結果が有効であることも同時に示された。

本研究では大型構造物への適用を見据えた超長梁の新たな圧縮力伝達方法が提案され、解析並びに実験によってその有効性が明示された。示された概念は従来とは異なる革新的な圧縮力支持法であり、大規模構造物を主とする宇宙利用の拡幅に寄与するものと考えられる。