

氏 名	鈴 谷 二 郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 61 年 1 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 34 年 3 月 東北大学工学部建築学科卒業

学 位 論 文 題 目 補剛圧縮材の弾塑性座屈と座屈後変形の局所性に関する研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 内山 和夫 東北大学教授 志賀 敏男
東北大学教授 和泉 正哲

論 文 内 容 要 旨

本論文は、座屈によって部材の耐力の低下が起こらないように変形（撓み）が弾性的に拘束された補剛圧縮材の、弾塑性域における挙動に関する検討結果をまとめたものである。

序章では研究の目的と、既往の研究、及び本論文における研究の進め方について述べられている。

建築構造物は種々の外力に対して安全でなければならないが、地震、豪雪、暴風等の自然災害は暫々予測をこえる規模となる。従って大災害時には、部材の応力が許容応力度を超えて降伏することが予想されるが、このような場合でも構造物が崩壊に至ることがないようにしなければならない。

鋼構造物では座屈に対して補剛された圧縮部材を用いることが多く、連続して補剛される場合は弾性基盤上の圧縮材、中間の数点で補剛される場合は弾性支点上の圧縮材としてモデル化されている。何れの場合も補剛材はばねに置換して扱われるが、ここではその目的に従って、種々の解析と実験結果から圧縮材とばねから成る系の座屈後の挙動を明らかにする。

補剛材、或いは圧縮材が弾性範囲にあるときの挙動に関しては、多くの研究成果があるが、何れかが降伏した後の挙動は解明されていない点が多い。従って補剛支点に加わる力についても、特定の変形状態において圧縮材が降伏した時の圧縮材の剪断力が、設計応力として採用されている。

補剛圧縮材の弾塑性問題として、圧縮材の変形が進んで補剛材が降伏した後の問題と、圧縮材自身が降伏した後の 2 つの問題がある。前者の問題に関しては、座屈変形が進んで降伏が生じた後に見られる、部材の一部分の変形のみが大きくなって周期性を持たない、所謂〔座屈変形の局所性

(Localization of Buckling Pattern)] が現れる典型的な例として、弾塑性基盤上の圧縮材が解析の対象とされている。後者の問題に関しては、補剛された部材が降伏した後に塑性関節が形成され、その構造に固有の崩壊機構に達する前に、座屈によって部材の耐力が失われてはならないという考え方から、弾性支点上の圧縮材が降伏した後に支点に加わる力が専ら検討の対象とされている。

本論文では、弾性支点上の圧縮材については、前に挙げた2つの弾塑性問題を扱い、また弾性基盤上の圧縮材については、基礎のばねが降伏した後の問題を扱い、それぞれ圧縮材の耐力と変形性状および座屈後に変形の局所性が現れる過程について検討している。

材の降伏を考慮した解析では、荷重の増加に伴って降伏した領域が断面内と材軸方向へ広がって行く過程を追跡する必要がある。降伏した領域が断面内に広がる事によってその断面の剛性が変わるので、解析にあたっては、材軸上の各点で異なる剛性の値を採ることが可能な解法を用いなければならぬ。一般に材の降伏を考慮した解析では、圧縮材を同じ塑性条件式で表わせる区間に分割して、境界条件と連続条件を満たす解を求める方法が採られる。この考え方による解法で、よく用いられる解法がいくつか挙げられるが、変形性状、特に変形モードについての解析を行うのに適当な解法は見出せない。

本論文では選点法を用いて、圧縮材に初期撓みを与えて解析を行っている。選点法では材軸に沿って異なる剛性を与えることが可能であり、試行関数に固有モードを採用すれば、弾塑性域における変形モードの解析を行うことが出来る。選点法は重み付き残差法の1つであるが、他の方法に比べ塑性条件式を容易に解析に採り入れる事が可能であり、大撓みを考慮した幾何学的非線形を含む場合の解析も比較的容易である。

初期撓みの与え方は問題によって異なるが、座屈モードと同じモードの初期撓みを持つ圧縮材の変形は、初期撓みを微小にする事によって完全な圧縮材の座屈後の変形に近づける事が出来る。従って座屈後の挙動を検討する際は座屈モードのみ、或いは座屈モードとそれより低次のモードを含む多重モードの微小初期撓みを与えている。また圧縮材の補剛力について検討する際は、現実に存在すると考えられる大きさと、モードを持つ初期撓みを与えて解析を行っている。

第1章では補剛された圧縮材の弾性域における性状について検討している。初めに選点法を用いた線形の釣合式を導いて、選点法を用いて得られた解と正解との比較を行った。弾性支点上の圧縮材については、中間の1点で補剛された圧縮材の座屈荷重が、1波のモード(モード2)の座屈荷重に達するのに必要なばね定数の値を求めて正解との比較を行い、材長を等分割する点を選点として採ると最も良い結果が得られることを確認した。また弾性基盤上の圧縮材については、基盤のばね定数によって座屈モードが変わる点における、座屈荷重とばね定数を与える式を求めて正解と比較し、選点数を座屈モードの次数以上採って求められる値が十分な精度を持つことを確認した。次に大撓みを考慮した非線形の釣合式を導いて、座屈モードが遷移する値に近いばね定数を持つ弾性支点上の圧縮材と弾性基盤上の圧縮材に、微小な多重モードの初期撓みを与えて解析を行なった。何れの場合も大変形の領域で座屈モードより低次の成分は増大し難く、高次のモード成分は初期撓みに含まれない成分が現れる場合もあって、大変形時に高次のモードへ分岐する可能性があることが

認められた。

第2章では支点ばねの力-変位関係がBi-Linear 型の特性を持つ場合の、弾塑性支点上の圧縮材について検討している。初めに圧縮材の大撓みと補剛支点の弾塑性を考慮した増分型の選点法釣合式を導き、解析の手順について述べている。

微小な多重モードの初期撓みを与えた圧縮材の解析では、圧縮材の変形が進んで支点ばねが降伏した後に、支点の変位が進む負荷状態にある釣り合いと、変位が戻る除荷状態の釣り合いがあって、除荷状態の釣り合いは不安定である。補剛支点が1個で座屈モードが2の圧縮材は、降伏荷重が座屈荷重の90%の場合は、降伏後すぐにモード1の成分が増大して荷重が下がる。同じく80%と70%の場合は支点が降伏した後も荷重の増加があり、荷重が増加する間で座屈モードが卓越し、荷重が下がる過程でモード1の成分が大きくなる。補剛支点が2及び3個の圧縮材も、荷重が下がる過程で座屈モードより低次の成分が卓越するが、最大荷重時における支点の状態は、一部の支点が弾性のままでその釣り合いが不安定となって最大荷重に達する場合と、全ての支点が降伏して最大荷重に達する場合とがある。降伏荷重が座屈荷重の90%のときは前者となり、80%及び70%のときは後者の場合となっている。

次に現実の大きさの初期撓みを持つ、中間の1点で補剛された圧縮材の支点ばねが、現行の設計基準で定めた補剛材の設計応力で降伏した場合の耐力について検討したが、その結果は支点のばね定数が大きい場合にのみ圧縮材の耐力が座屈荷重に達することが可能であることを示している。

複数の点で補剛された圧縮材が現実の大きさの初期撓みを持つ場合の挙動について微小初期撓みを与えた解析結果と比較すると、支点が降伏した後の荷重の増加が少なく、1個の支点で降伏が生ずると変形が大きくなって、他の支点も降伏して荷重が下がり、支点数が2の圧縮材では降伏荷重が座屈荷重の90%の場合と80%の場合は似た挙動を示している。

弾塑性ばねで補剛された圧縮材の実験における、2及び3点で補剛された圧縮材は、現実の大きさの初期撓みを持つ圧縮材の解析結果に見られた挙動を示し、最初の支点が降伏した後の荷重の増加があっても少なく、最大耐力に達した直後に全ての支点が降伏するが、支点の変位が戻る除荷状態は現れていない。

第3章では、基盤の力-変位の関係がBi-Linear 型の特性を持つ、弾塑性基盤上の圧縮材について検討している。

最初に、前章と同じ考え方に従って増分型の釣合式を導き、解析の手順について述べている。

半波（モード1）の微小初期撓みを持つ圧縮材に、座屈荷重の90%の荷重が加わったときに基盤が降伏する場合は、降伏後に座屈モード、或いは座屈モードが逆対称モードの場合はそれより1次低いモードへの分岐が見られる。終局の変形は初期撓みモードと、座屈モードまたはそれより1次低い対称モードに、モード3の成分を含んだ局所性を持つものとなっている。

座屈モードと同じモードの微小初期撓みを持つ弾塑性基盤上の圧縮材は、座屈モードが低次の場合には基盤の降伏範囲が狭く、弾塑性支点上の圧縮材と似た挙動を示す。座屈モードが6次以上になると基盤が降伏した後に、低次のモードへの分岐が起こる。基盤が降伏した後の分岐モードは、座屈モードと同じ対称性または逆対称性を持つもので、荷重の増加とともに順次に低次のモードへ

の分岐が見られる。降伏荷重が座屈荷重の90%の場合には終局時に座屈モードより高次のモードへの分岐も見られる。降伏荷重が80%の場合は分岐モードの数が少なく、高次のモードへの分岐は見られないが、低次のモードが卓越して終局では局所性が強い変形となる。

上記の解析の何れの場合にも、降伏した部分の基盤の変位が進む負荷過程と、変位が戻る除荷過程があるが、除荷過程における変形は初期撓みモードと同じ弾性変形モードであり、負荷過程において他のモードへの分岐が起こり局所性を持った変形が現れている。

第4章では中間の1点で補剛された圧縮材をとり上げて、圧縮材が降伏した後の補剛圧縮材の挙動について検討している。

初めに圧縮材の応力度－歪度関係が完全弾塑性の場合の曲げ剛性の低下率 r を定め、軸力と曲率の変化に伴う r の増分を用いて、選点法によって圧縮材の釣合式を解く手順について述べている。

補剛効果の検討の基礎となる座屈曲線を、単純支持された圧縮材に現実に不可避とされる大きさ $(L/1000)$ でモード1の初期撓みを与えて解析した結果から求めている。補剛力と軸力の比は、ばね定数が小さく細長比が大きいくほど大きくなる。不可避の大きさの初期撓みを持つ圧縮材が、期待される耐力である完全に補剛された場合の耐力に達し、補剛力がその2%を越えない為には、弾性域でモード2の座屈荷重に達するときの値 $(\alpha=16)$ 以上のばね定数が必要である。降伏後にモード2の成分が現れて局所性を持った変形となるのは、ばね定数が大きく圧縮材の耐力がモード2の座屈荷重に近い場合であり、この場合の補剛材に加わる力と荷重の比は弾性域における値を大きく越えることはない。

通常の圧縮材に存在すると考えられる大きさ $(L/250)$ の初期撓みを持つ場合は $\alpha=12\sim 24$ の範囲で、圧縮材が降伏した後の補剛力を軸力の2%以下とすることは困難である。従ってこの場合の変形は対称で半波(モード1)形状に近く、降伏荷重時の補剛力比を近似的に求め易いので、この値を基に補剛材の設計応力を定めるのが合理的と考えられる。

弾性ばねで補剛されたH型鋼圧縮材の実験では、補剛圧縮材の上記の性状が確認されたが、現実の圧縮材の初期撓みは多くのモード成分を持ち、且つ不可避の偏心がある為に局所性を持った変形が現れ易い。

第5章は結語で上の各章で検討した結果をまとめたものであるが、座屈後の変形に局所性が現れる過程と、補剛圧縮材の耐力に関する事項を中心に記されている。

審査結果の要旨

鋼構造物の圧縮材やはり材の中間が横方向の部材によって支持されると、それらの変形拘束作用で曲げ座屈や横座屈応力が増大する。またそれらの支点が節となって座屈を生じ、座屈後も靱性を保有するためには、支点に或る耐力と剛性が必要である。前者の弾性域の座屈問題については既に解明されているが、後者の支点の補剛については未だ充分解析されておらず、設計上単純な便法が用いられているにすぎない。近年、地震や暴風時に構造物が大きな靱性を保有することが要求されていることから、中間支点で補剛された圧縮材の弾塑性座屈や塑性域における支点の補剛に関する解析が必要とされている。

本論文は、弾塑性域における補剛圧縮材の座屈ならびに座屈後の挙動について解析を行ったもので、5章からなる。

序章では、既往の研究と本論文における研究の進め方について述べている。

第1章では、中間の数点で補剛される弾性支点上の圧縮材と、連続的に補剛された弾性基盤上の圧縮材の線形問題を解いて、本論文で用いている選点法による解の精度について検討するとともに、弾性域で座屈変形が進んだ大変形領域における挙動について検討している。

第2章では、非線形ばねで補剛された弾塑性支点上の圧縮材を扱い、補剛支点が降伏した後の補剛圧縮材について、解析と実験によってその挙動を明らかにするとともに、現行の設計規準に定められた大きさの補剛力で補剛支点が降伏した場合の補剛圧縮材の耐力と変形状態について検討している。補剛支点が降伏した後の挙動について検討した例は無く、ここで得られた結果は、補剛された構造の基本的な性状を示す新しい知見である。

第3章では、弾塑性基盤上の圧縮材を扱い、基盤の降伏後に生ずる分岐モードについて検討している。ここでは、基盤の降伏領域の拡大に伴い、荷重が増加する過程においても順次に低次のモードへの分岐が起り、局所性を持った変形となることを明らかにした。また分岐モードは初期撓みモードと同じ対称性を持つことを示した。これらは、塑性域における座屈に見られる座屈後変形の局所性に関する新しい知見である。

第4章では、弾性支点上の圧縮材が降伏した後の問題を扱っている。ここでは、塑性領域における圧縮材の撓みの微分方程式に剛性低下率を導入して漸近的に解く方法を示し、補剛力が現行の設計規準を越えないための初期撓みの大きさとばね定数の限界を示した。また初期撓みより高次のモードを含む局所性を持った変形に移行する条件を示した。

第5章は、結論である。

以上要するに本論文は、圧縮材やはり材の支点に必要な耐力ならびに剛性を明らかにするため、補剛圧縮材の座屈後の弾塑性域における挙動を解析したもので、構造工学ならびに建築学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。