

報告番号 ※ 甲 第 2626 号

主論文の要旨

題名

コンクリート構造のポストピーク
挙動に関する解析的研究



氏名 中村 光

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	中村 光
<p>巨大かつ重要な土木構造物に対して、コンクリートのような非線形材料を適用する場合に、真の終局状態を理論的に明める点が、最大の未解決な課題として存在する。すなわち、最大荷重時およびその点以降のポストピーク挙動を逐次追跡し得る理論が構築され、同時にそれを検証する各種の実験が必要と考えられるのである。</p> <p>コンクリート構造のポストピーク挙動に関しては、従来は主に実験的に研究されてきているのであるが、多様な影響要因を含んでいるため、実験変数が多くなり、現在まで系統的な研究は行われていないのが現状と言える。例えば、コンクリート構造を構成する材料の材料非線形性あるいは構造自身の変形にともなう幾何学的非線形性や、コンクリート構造内の主鉄筋の座屈、せん断変形の増加などは、ポストピーク挙動に大きな影響を及ぼす要因として挙げられるが、破壊レベルのどの段階でどの様に影響を与えるかは、いまだに明確にされていない。もし上記の現象を考慮し、ポストピーク挙動を精度よく評価し逐次に破壊段階を記述し得る解析理論が構築されれば、各破壊要因の破壊段階に応じた影響度を定量的に把握することができて、設計の合理化が格段に進歩することになる。</p> <p>本論文は、このようなポストピーク挙動の解明を主眼とし、プレピーク、ポストピーク、破壊へと至るコンクリート構造の変形挙動を一貫した数値理論で解析的に評価することを目的として、その理論の構築ならびにコンクリート構造特有の現象へのその適用方法を10章にわたって論述したものである。以下に各章の概要とその結果について述べる。</p> <p>第1章では、ポストピーク挙動解明に重要な役割を示すと考えられる要因について概観するとともに、本研究の目的および本研究の内容について述べた。</p> <p>第2章では、コンクリート構造を解析的に解明するために必要となる基礎方程式を示すとともに、構造物の安定性に対する理論的検討を行った。</p> <p>まず、コンクリート構造の材料非線形性および幾何学的非線形性を表現するための基礎方程式として、有限変形問題に対する増分形式で記述された仮想仕事方程式を導びき、その離散化を行うことで、有限要素解析に用いられる有限変位理論に基づく剛性方程式の定式化を行った。さらに、ポストピーク領域は構造物が安定性を喪失する</p>				

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	中村 光
<p>領域であるため、構造安定性に対する一般的数学的表現から、RC構造特有の安定問題を抽出し、離散化された系に対するその適用を行った。さらに安定性が失われる構造特異点であるlimit pointおよびbifurcation pointに対する理論的検討を行い、解析を実行する際の構造特異点の取扱およびその力学的意義を明確にした。</p> <p>第3章では、コンクリート構造のポストピーク挙動を解析的に解明する際に必要となる、本論文で用いる材料の構成則ならびに数値解析手法の提示を行った。まず、コンクリート構造を構成する材料に対する構成則を一軸応力-ひずみ関係と共に提示した。ここで示した応力-ひずみ関係は、多軸応力を受ける材料を等価な一軸の関係に置換したものであり、これにより構成則レベルでの数値解析の簡素化を可能にした。続いて、材料非線形性と幾何学的非線形性を含むコンクリート構造の非線形挙動を追跡可能にする非線形求解法の定式化を新たに行った。これらの求解法のアルゴリズムは、材料の非線形の強さによって影響され、コンクリートあるいは鉄筋コンクリートのような強非線形材料に対しても有効である必要があり、各種検討の結果bifurcation point後の分岐経路解析手法としては、固有値問題を解いて得られる固有ベクトルにより変形モードを推定し、試行錯誤的にbifurcation pathを求めていく方法を提案した。提案した方法は、任意の釣合状態に対するbifurcation path方向を逐次表現できるため、コンクリートのような材料非線形性問題を取り扱うときには最も有効な方法であることが判明した。</p> <p>第4章では、コンクリート構造におけるbifurcation pointの物理的意義およびpost bifurcation挙動を簡単な数値解析例を用いて明確にした。コンクリート構造のようなひずみ軟化材料は、その材料特性に依存した形でbifurcation pointが生じるため、本章では特に材料的側面からbifurcation pointの意義について議論を行った。</p> <p>まずコンクリート一軸部材を考え、負の固有値および負の固有値に対応する固有モードとbifurcation point後の挙動の関係を明らかにするとともに、imperfectionの導入やlocalization問題のbifurcation問題に対する位置づけを行った。さらに、コンクリートのようなひずみ軟化材料では、弾性安定の分類に従うlimit pointが、その材料特性に依存して複数の平衡状態が存在するという意味においてbifurcation pointとな</p>				

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	中村 光
------	-----	---	----	------

る可能性が存在することを明らかにした。

第5章、第6章および第7章では、各種のコンクリート構造に対する本手法の適用を行い、構造安定性の喪失が構造物の実挙動とどのような関係にあるのかを記述した。

第5章では、鉄筋コンクリートはりを対象とし、解析手法の妥当性を検証するとともに、limit pointおよびbifurcation pointにおける構造物の挙動が、実際の鉄筋コンクリートはりの挙動とどのような関係を持つのかを調べた。その結果、bifurcation pointが鉄筋コンクリートはり構造のせん断破壊に密接な関係を有し、bifurcation point後のbifurcation pathを選択することで構造物が破壊に至る可能性を示した。鉄筋コンクリートはりのせん断破壊は、現在もお十分に解明されておらず、特に各種のせん断破壊モードがどのような要因によって支配されるかは明かではなかった。しかし本解析より得られた分岐後の釣合径路上の挙動を調べることで、スターラップのない鉄筋コンクリートはりを対象とした場合には、shear bandの発生と共に構造物が破壊にいたること、スターラップのあるはりの場合、荷重載荷点下部に局所的な変形の集中が生じることで、破壊に至ることを明らかにした。

第6章では、鉄筋コンクリート柱のポストピーク挙動に対する考察を行った。ここでは、棒要素に対しせん断変形の影響を簡明に評価し得る大変形解析の新たな定式化を行うとともに、異なる材料が組み合わされた構造物の解析に有効であるlayered beamの導入を行い、鉄筋コンクリート柱部材に対する有限要素解析手法の開発を行った。そして、既往の実験結果との比較より、本手法が大変位繰返し部材の履歴挙動や各種要因の影響を精度よく評価できることを検証した。続いて、Collinsにより提案された圧縮場理論を曲げ、せん断、軸力を受ける鉄筋コンクリート断面に拡張することで、鉄筋コンクリート断面のせん断剛性劣化モデルの定式化を行い、開発した解析手法に導入することで、せん断変形が構造物に及ぼす影響を明確に示した。さらに鉄筋コンクリート柱の構造不安定性に対する検討を行い、鉄筋コンクリート柱の終局破壊点が、bifurcation pointにより定義できる可能性を示した。

第7章では、第6章で開発した鉄筋コンクリート柱に対する手法をラーメンのような不静定構造物へ拡張し、不静定なコンクリート構造の終局挙動の解明を行った。そ

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	中村 光
<p>の結果、ラーメンのような不静定構造物の靱性を考える場合には、複数の部材の組合せあるいは部材に生じる軸力変動の影響で、変形の進行に伴い各部材の性状が大きく変化するため、橋脚のような単一部材より得られた成果をそのまま取り込むことはできないことが明らかになった。そこで実験結果との比較より、鉄筋コンクリートラーメン構造の靱性の評価法として新たに、bifurcation pointを用いることを提案した。bifurcation pointを用いることで、靱性が各部材ではなく構造系全体に対して定義されることになる。</p> <p>5章、6章および7章では、各種の構造物に対し構造安定性の喪失と構造物の実挙動の関係を調べたが、いずれの場合にも構造物の破壊はbifurcation pointで定義すればよいこと、bifurcation point後のbifurcation pathにより破壊時のコンクリート構造の挙動を再現できることが明らかになった。</p> <p>第8章では、スターラップが組合わさった主鉄筋の座屈性状を有限変形理論に基づく解析より明確にし、座屈挙動を含む鉄筋の応力-ひずみ関係を提案した。さらに鉄筋の座屈がコンクリート構造物に及ぼす影響について解析的検討を行い、鉄筋の座屈区間はスターラップの影響よりもむしろ構造物の破壊領域に密接に関係すること、ならびに鉄筋の座屈は被りコンクリートの劣化によるコンクリートの荷重支持能力が低下した後に生じることを明らかにした。また、提案した鉄筋の座屈モデルを用いれば、座屈後の構造物の挙動を精度よく評価できることを実験結果との比較より示した。</p> <p>第9章では、第6章で開発した解析手法を用い、鉄筋コンクリート部材が繰り返し載荷荷重を受ける場合の変形限界点を解析より見出し、解析上の靱性率を定義することで、帯鉄筋比・引張鉄筋比・せん断スパン比・軸方向応力度が靱性に及ぼす影響を解析的に検討した。そして、解析結果より得られた各種要因の影響を組み合わせることで鉄筋コンクリート部材に対する靱性評価式の提案を行った。さらに既往の実験結果と比較し、提案した靱性評価式が、靱性率の大小にかかわらず、また土木・建築などの諸元に対しても適用可能で、既往の推定式よりも精度が良いことを明らかにした。</p> <p>第10章は結論であり、本研究で得られた成果について要約している。</p>				