

木質構造限界状態設計法に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

限界状態設計法は、構造物が通常の使用に支障をきたす過度の変形や損傷を生じない限界の状態（使用限界状態）や、建物が倒壊を免れる限界の状態（終局限界状態）に注目し、そのような限界を超える確率（損傷や破壊を生じる確率）を、構造物の耐用期間を通し、一定限度以下に抑えようとする構造設計法である。

このような考え方を、実務設計に適用するための現実的な方法として、荷重・耐力係数法が用いられている。荷重・耐力係数設計法の体系は、現行の建築基準法が基本としている許容応力度設計法と形式的に同様であり、設計耐力（＝耐力係数×耐力の公称値） \geq 設計荷重効果（＝荷重係数×荷重効果の基本値）と表現される。現行の許容応力度設計法と大きく異なる点は、安全性・使用性の確保に対し、荷重や耐力の確率変動や安全性・使用性についての確率的信頼性が考慮されていることである。

本研究は、この設計法をわが国の木質構造に適用するにあたって、定量的評価上の懸案事項となっていたいくつかの課題に対して検討を加え、「木質構造限界状態設計指針」の提案を可能としたものである。

第2章では、確率分布パラメータに及ぼす推定手法の影響について検討した。構造部材の耐力を評価する場合、仮定する確率分布モデルによって、計算される破壊確率が異なる。このため、どのような確率分布モデルを採用するかは、限界状態設計法による定量的評価の重要な因子となる。

確率分布モデルの適否について定量的に論じるためには、まず標本から母数（パラメータ）を推定する手法についての検討が必要になる。この手法としてはこれまで、最尤法、積率（モーメント）法、線形最小二乗法、非線形最小二乗法、Foschiらの方法などが提案されている。そこで、これらの推定手法がパラメータ算出におよぼす影響を製材の曲げ強度、曲げヤング係数に注目して検討し、赤池情報量規準（AIC）を用いて、各種の確率分布モデルの適合性について検討した。その結果、分布パラメータの算出が常に可能なこと（計算結果が必ず収束すること）、打ち切りデータにも対応できることなどから、最尤法が最も適しているとの結果を得た。

この推定法を適用して、正規分布、対数正規分布、2Pワイブル分布、3Pワイブル分布を比較した結果、確率分布モデルとしては、ワイブル分布、特に物理的意味の明確な2Pワイブル分布が適していることを示した。

第3章では、ワイブル分布の下側許容限界値の算出法について検討した。荷重・耐力係数法を適用する際には、許容応力度法と同様に、強度の公称値が必要である。この公称値は、下側5%値（信頼水準75%）とされることが多い。

その算出方法は、確率分布形を仮定して算出する方法（パラメトリック法）と順序統計量として算出する方法（ノンパラメトリック法）とに大別できるが、破壊確率の計算は確

率分布形を仮定して行うことが一般的であるため、公称値はパラメトリック法を用いて算出するのが望ましいと考えられる。しかし、正規分布及び対数正規分布の公称値についてはパラメトリック法による算出方法が確立しているのに対し、ワイブル分布については、これまでノンパラメトリックが主流となっている。

そこで、正規分布及び対数正規分布において用いられている K 値を利用して、ワイブル分布の下側許容限界値を算出する手法を誘導した。この手法による数値シミュレーションを、正規分布、対数正規分布、ワイブル分布に対して行い、その定量的な妥当性を確認した。

第 4 章では、構造部材の設計（破壊）点におよぼす確率分布モデルの影響について検討した。部材例として床梁と母屋を取り上げ、それらの終局限界状態と使用限界状態における設計点を、曲げ強度、曲げヤング係数に対し、正規分布、対数正規分布、2P ワイブル分布、3P ワイブル分布を仮定して算出し、適用する確率分布モデルによる相違を比較し、以下の点を明らかにした。

1. 設計点に関する確率分布の影響

(1) 100%のデータから算出したパラメータを用いた場合の、床梁および母屋の使用限界状態における設計点は、信頼性指標 (β) が一定値を越えると、仮定分布による差が生じ、対数正規分布、3P ワイブル分布、2P ワイブル分布、正規分布の順に設計点の値が小さくなる。

(2) 下側裾野 15%のデータから算出したパラメータを用いた場合には、実用的な目標信頼性指標の範囲内では、仮定分布による差異がほとんど生じない。この傾向は、特に変動係数の小さい場合に明白である。

2. 設計点と公称値の比較

(1) 終局限界状態の場合、公称値としての下側 5%値（信頼水準 75%）を基にした基準強度特性値を用いれば、目標信頼性指標を確保できる。

(2) 使用限界状態の場合、設計点は基準弾性特性値（50%値（信頼水準 75%））付近に存在する。

第 5 章では、耐力係数におよぼす確率分布モデルの影響について検討した。強度の公称値を下側 5%値（信頼水準 75%）、曲げヤング係数の公称値を平均値として、荷重・耐力係数を算出し、樹種や等級の違いにより荷重・耐力係数の値がどのように異なるのかを比較し、以下のような結果を得た。

1. 終局限界状態における耐力係数や主荷重の荷重係数は、対数正規分布仮定の標準偏差 (ξ) や 2P ワイブル分布の形状係数 (m) によって決まる。これらの値は樹種や等級によって異なるため、画一的な荷重・耐力係数を用いることはできない。また、主荷重以外の荷重係数の値は、目標信頼性指標、樹種、等級によらずほぼ一定である。

2. 終局限界状態での耐力係数の値は、公称値を下側 5%値（信頼水準 75%）とすると、地震荷重を含むか含まないかで、標準偏差や形状係数の影響が異なる。しかし、公称値を平均値とすれば、地震荷重を含むかどうかによらず、同様の傾向となる。

第 6 章では、現行の許容応力度設計法の信頼性指標を算出した。実務設計では設計者が目標信頼性指標を設定して、提示された荷重・耐力係数を用いて設計を行うことができるが、設計者各人が目標信頼性指標を決めることは実際には難しく、既往の設計法による構造物と同程度の安全性を目標とする方法（既存設計法のキャリブレーション）を採用するのが最も現実的であるとされている。このためには、既往の設計法による構造物が、実際にどの程度の信頼性指標を持つかが、設計資料として示されている必要がある。

荷重・耐力係数は、目標信頼性指標と各効果の確率分布形、平均値／基本値または平均

値／公称値から算出可能である。そこで、平均値／基本値または平均値／公称値を変動係数で表現する計算式を誘導し、荷重・耐力係数の算出法を求めた。このキャリブレーションを行うことにより、現行の許容応力度設計法に従って設計された構造物が、各種の設計条件に対し、どの程度の信頼性指標を持つかを算出した。

第7章では、限界状態設計法に関するわが国の現状と、この設計法を適用することの実際の利点、また今後この設計法を定着させ、定量的な改善を行うための課題について論じた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 平 井 卓 郎
副 査 教 授 長 澤 徹 明
副 査 助 教 授 小 泉 章 夫
副 査 教 授 小 松 幸 平 (京都大学生存圏研究所)

学 位 論 文 題 名

木質構造限界状態設計法に関する基礎的研究

本論文は図 26、表 24、文献 55 を含む総頁数 89 の和文論文で、他に参考論文 6 編が添えられている。

限界状態設計法は、構造物の使用に支障をきたす過度の変形や損傷を生じない限界の状態（使用限界状態）、構造物が倒壊を免れる限界の状態（終局限界状態）などに注目し、その限界を超える確率（損傷や破壊を生じる確率）を、構造物の耐用期間を通し、一定限度内に抑えようとする構造設計法である。この設計法を実務設計に適用する現実的方法として、荷重・耐力係数法が提案されている。荷重・耐力係数法が現行の許容応力度設計法と大きく異なる点は、安全性・使用性の確保に対し、荷重・耐力の確率変動や安全性・使用性についての確率的信頼性が考慮されていることである。

本研究は、上記の設計法をわが国の木質構造に適用するにあたって解決すべき、いくつかの定量評価上の課題に対し、以下のような詳細な検討を加えたものである。

1. 確率分布パラメータに及ぼす推定手法の影響についての検討

構造部材の耐力を評価する場合、確率分布モデルによって、計算される破壊確率が異なる。この確率分布モデルの適否を論じるには、まず標本分布から母数分布を推定する手法の検討が必要である。この研究では、製材の曲げ強度、曲げヤング係数に注目し、最尤推定法、積率（モーメント）法、線形最小二乗法、非線形最小二乗法、Foschi らの方法について、赤池情報量規準（AIC）を指標として検討を加えた。その結果、計算結果が必ず収束すること、打ち切りデータに対応できることなどから、最尤法が最も適していることを示した。

最尤法を適用して、正規分布、対数正規分布、2P ワイブル分布、3P ワイブル分布を比較した結果、確率分布モデルとしては、2P ワイブル分布が最も適していることを示した。

2. ワイブル分布の下側許容限界値の算出法についての検討

荷重・耐力係数法を適用する際に必要な強度の公称値は、下側信頼水準 75%の 5%値とされることが多い。その算出方法は、確率分布形を仮定して算出する方法（パラメトリック法）と順序統計量として算出する方法（ノンパラメトリック法）とに大別できるが、破壊確率の計算にあたっては、パラメトリック法による公称値を算出するのが望ましい。しかし、ワイブル分布については、これまでパラメトリック法による算出方法が示されていない。そこで、正規分布における K 値を利用して 5%値を算出する手法を誘導し、数値シミュレーションによってその妥当性を検証した。

3. 構造部材の設計点におよぼす確率分布モデルの影響についての検討

床梁と母屋の曲げ強度、曲げヤング係数を取り上げ、終局限界状態と使用限界状態における設計点を各種の確率分布モデルに対して計算し、実用的な目標信頼性指標の範囲内で設計点を求めるには、100%のデータを用いるより、下側裾野 15%のデータからパラメータを算出する方が、確率分布仮定による差が小さくなり、安定した評価が可能になることを示した。また、終局限界状態では、公称値として下側信頼水準 75%の 5%値を、使用限界状態では、下側信頼水準 75%の 50%値を用いるのが適当であることを確認した。

4. 耐力係数におよぼす確率分布モデルの影響についての検討

上記の公称値を指標として荷重・耐力係数を算出し、各樹種、等級に対するその値を比較し、以下の結論を得た。(1)終局限界状態における耐力係数や主荷重の荷重係数を決める分布パラメータは樹種や等級によって異なるため、これを考慮した荷重・耐力係数の設定が必要である。(2)終局限界状態での耐力係数に及ぼす標準偏差や形状係数の影響は、公称値を下限推定値とすると、地震荷重を含むかどうかで異なるが、公称値を平均値とすればそのような違いは生じない。

5. 現行の許容応力度設計法の信頼性指標の算出

限界状態設計法では、設計者各人が目標信頼性指標を設定することが許されている。しかし、この設定は実際には難しく、既往の設計法と同程度の安全性を目標とするのが現実的であるとされている。このためには、既往の設計法による構造物が、実際にどの程度の信頼性指標を持つかを、設計資料として示しておく必要がある。そこで、現行の許容応力度設計法に従って設計された構造物の、各種の設計条件に対する信頼性指標を算出し、限界状態設計法を実務に適用するための目標信頼性指標を提示した。

以上の検討により、わが国の木質構造に限界状態設計法を導入するために必要な基礎手法の確立と数値評価資料の整備を行った。この成果により、日本建築学会における「木質構造限界状態設計指針」の提案を可能とし、わが国の木質構造設計に大きな前進をもたらした。

よって審査員一同は、堀江和美が博士（農学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。