

## 論文の内容の要旨

論文題目 建築物の構造設計における温度荷重と荷重組合せに関する研究

氏名 中島秀雄

本論文は、建築構造物が温度変化により伸縮し、伸縮を拘束する部材に応力が発生する現象を扱う。その現象を構造設計で考慮するためには、構造部材の温度変化を把握することが必要である。また、温度変化は日常的に生じているので、雪、風、地震などの荷重が作用する時にも温度変化の影響を適切に評価する必要がある。本論文は主にこの 2 つの課題に対する評価法を明らかにすることで、合理的な構造設計に寄与することを目的としている。

橋梁などの土木構造物に対しては温度変化に対する設計法が基準化されているが、建築構造に対しては十分な資料が整備されていなかった。外気に直接接している土木構造物と異なり、建築物の場合は外壁や屋根等により外気と遮断されている場合が多い。また、外壁の断熱仕様や室内温度の条件などが個々の建築物によって異なり、構造体温度を一律に定めることができない。本論文では、個々の条件を反映して構造体温度を簡易に推定する方法を検討し、提案する。雪、風、地震等の荷重と温度荷重との組合せに関しては既往の研究では明らかにされていない。本論文では過去 53 年間の気象データに基づいて組合せ応力を直接求める方法を試み、その結果を「荷重係数」を用いた設計式として提案する。

1 章では温度変化により建築物にどのような影響が生じるかを明らかにするとともに、既往の研究、基規準を調査し、残された課題を抽出した。

建築構造物に用いられている鋼材、コンクリートなどの材料は温度変化に比例して伸縮する性質がある。例えば長さ 100m の梁は温度が 30℃上昇すると 30mm 長くなり、建物の両端で柱を外側に倒すような変形を生じさせる。この変形により仕上げ材が損傷を受けたり、扉が開閉しにくくなったりすることがある。ブレースや耐震壁等が配置されている場合は、これらの耐震要素が温度変化による梁の伸縮を拘束し、拘束材には反力が作用する。この反力によりブレースの座屈や耐震壁のひび割れが生じることがある。1 章では実際に温度変化によりひび割れやボルトの破断などの不具合が生じた事例を紹介し、温度変化の影響の大きさを明らかにした。

建築物に温度変化を生じさせる要因を洗い出し、発電所、冷凍倉庫等の内部熱源、コンクリート硬化時の水和熱、火災などを調査した。これらの特殊な熱源および対応する構造物については、温度の評価、高温時の部材強度、剛性等に関する一連の研究が行われ、設

計基準としてまとめられている。本論文ではこれらの特殊熱源は扱わず、「外気温、日射の影響による温度変化」を検討の対象とする。

既往の研究において、外気温・日射などの温度条件はデータが統計処理され、設計荷重として整理されている。建築物の温度変化や変形についても多くの実測例がある。しかし、外気温の変化のみでは実測した変形を推測することが困難で、構造部材への熱伝達機構や日射の影響を考慮して構造体温度を推定する必要があった。この問題は、有限要素法を用いて時刻歴解析をすることで解決できるが、モデル化と計算に膨大な時間を要することと、設計荷重レベル（再現期間 100 年）に相当する外気温の時刻歴データが整備されていないという問題があり、実務設計向けではない。構造設計者が扱える簡易な算定手法の開発が必要であると考えられた。

2 章では、温度荷重に対する設計の現状を調査して課題を整理した。また、一部の課題について検討を行った。

まず、設計のフローを想定し、各ステップで行われる検討内容を調査することで、残された課題を抽出した。課題の内、「温度荷重に対する設計の要否判断」、「レベル 2 荷重に対する設計の考え方」、「日常的な繰返し温度応力に対する疲労の影響」については 2 章に検討結果を盛り込んだ。「要否の判断」には温度荷重による変形と応力を簡易に推定する手法を示し、判断の助けとした。「レベル 2 荷重」に関しては、レベル 1 の温度荷重に対し 10% 程度の増分しかないこと、部材が降伏した場合は剛性低下により温度応力が緩和されること、部材の終局耐力には温度荷重は影響しないことから設計に対する影響は小さいことを示した。「疲労に対する検討」では、鋼構造部材において応力が弾性範囲にあれば、供用期間 100 年程度の繰返し温度荷重に対しては疲労破壊が生じないことを示した。

次に設計者に対するアンケートにより、温度荷重を考慮した設計の実態を調査した。他の荷重との組合せは多くの設計例で検討しているが、組合せ応力は各荷重の最大値の単純和としており、荷重係数を用いた事例は 1 例しかなかった。既往の研究、基規準においても温度荷重との組合せ応力の評価法は提案されていないため組合せ応力に対する設計法の検討が必要なことがわかった。

前述したように 1、2 章で抽出した課題の内、「要否判断」、「レベル 2 荷重に対する設計の考え方」、「疲労に対する検討」は 2 章に検討結果を示した。「変動する外気温、日射に対する構造体温度の簡易算定法」と「他の荷重との組合せに対する応力の評価法」は本論文の主な課題として取り組みそれぞれ 3 章、4 章に検討結果を示した。

3 章では構造体温度を簡易に算定する方法を検討した。

鋼構造部材は比較的薄肉の鋼板から構成されることから、部材温度は周辺の気温とほぼ同じ温度と見なすことができる。さらに日射の影響を「相当外気温度」として評価することで部材温度を簡易に算定する手法を提案した。また、簡易算定法による予測値が実測値の上限となっていることを示した。鉄筋コンクリート部材の温度に関しては、熱容量が大きいことから外気温が断面全体に伝わるのに時間を要し、変動する外気温とは同じ温度に

ならない。このような部材の温度を推定するためには、外気温、日射の時間的な変動を考慮した熱伝導解析を行う必要がある。しかし FEM モデルを用いて熱伝導の時刻歴解析を行うことは膨大な作業と計算時間を要するため、構造設計者に対する負担が大きい。そこで、一日を周期とする温度変化を正弦波で近似し、「周期定常」を仮定して構造体温度を算定し、多層の部材構成を持つ 2 次元の断面に対する温度を簡易に算定する手法を提案した。また、精算法との比較により誤差は 5% 以内であることを示した。

4 章では他の荷重との組合せによる応力の評価法を提案した。

気象データに基づき日毎に発生している組合せ応力を算定することで組合せ応力の年最大値を直接求め、年最大値の分布から再現期間 100 年に対する組合せ応力を求めた。組合せ応力を主の荷重に対する応力の最大値と、従の荷重に対する応力の和の形で表現し、さらに従の荷重に対する応力を最大値×荷重係数という形に整理した。荷重係数の大きさに対する「応力比」、「基準温度」、「再現期間」の影響を検討し、荷重係数は応力比が大きい程、基準温度と最高、最低温度の差が大きくなる程、再現期間が短い程大きくなることを明らかにした。また、Turkstra の経験則を用いて主の荷重が年最大値となる日の組合せ応力により評価した場合は、本論文で検討した結果を近似できていることを確認した。以上の検討結果を踏まえた上で、設計用の荷重係数として、雪荷重との組合せに対して 0.8、風荷重との組合せに対して 0.7、地震荷重との組合せに対して 0.4 を提案した。また、雪、風、温度荷重が同時に作用する場合の組合せ応力も、これらの荷重係数を用いた推定式により予測できることを示した。

5 章では鋼構造と鉄筋コンクリート造の建築物のモデルを用いて、本論文で提案した「温度荷重に対する設計の要否判断」、「構造体温度の簡易算定法」、「他の荷重との組合せ応力の評価法」、「温度応力を低減する対策」について検証した。変形、応力の推定法を適用し設計の要否判断が可能であることを示した。簡易算定法による鉄筋コンクリート梁の温度の推定を試み、本手法が有効であることを示した。荷重係数を用いた組合せ応力は、単純和に対して 20% 程度の低減になることから、合理的な設計が可能になることを示した。温度荷重の影響を緩和する対策としては、断熱材による温度変化量の低減、エキスパンションジョイントによる建物長さの低減、ブレース、耐震壁などの拘束部材を温度変化が小さい位置に配置する事などが有効であることを示した。

残された課題、今後検討すべき課題として以下のものがある。

構造体温度の簡易算定法を提案したが、鉄筋コンクリート部材の温度の検証においては精算解との比較のみであり、実測例による検証が必要である。

組合せ応力の検討においては温度変化の要因として外気温のみを扱ったが、日射の影響を考慮した場合についても検討する必要がある。

「基準温度」は温度荷重の大きさに対する影響が大きいですが、設定方法は提案されておらず、検討が必要である。また、建築構造物の構築期間が長期にわたる場合に基準温度をどのように設定すべきかについても検討が必要である。