

学位論文題名

蓄熱槽を有する建物の地下部躯体の
温度分布性状に関する研究

学位論文内容の要旨

建物の最下部の地下2重スラブ空間を利用して設けられる冷暖房用の蓄熱槽は、夜間電力を利用して蓄えたエネルギーを昼間の空調負荷に応じて放出することにより、電力消費を平準化し、かつ熱源機器の容量の低減と高効率運転を図る上で長所を有しており、エネルギーの有効利用の面から有用な技術である。

一方、この蓄熱槽の熱源は、建物の基礎部並びにそれに隣接する地下部躯体に、部材相互の温度差による引張・圧縮応力や部材の厚さ方向の温度差による曲げモーメントなどの温度応力を生じさせる原因となる。しかし、その温度応力の前提となる躯体の温度分布性状(温度荷重)については、これまでほとんど明らかにされておらず、温度荷重及び温度応力は個々の設計者の判断に委ねられ、実績をベースに経験的に扱われているのが現状である。また、地下部躯体にひび割れ等の不具合が生じた場合、それが蓄熱槽に起因する温度応力によるものなのかどうか、温度の実態が明らかにされていないため、判断しにくく、とすれば施工不良やコンクリートの品質不良等に帰されることが多い。

本論文は、そのような背景から、蓄熱槽に係る地下部躯体の合理的で妥当な温度応力設計に資することを目的として、蓄熱槽によりもたらされる地下部躯体の温度分布性状について明らかにするものである。本論文は、実在の建物の温度実測とシミュレーション解析を行い、躯体温度の実態を把握し、次に、温度応力設計上重要なファクターである断熱材の厚さと躯体温度の関係、及び地盤の熱物性の違いや建設地域の違いが躯体温度に及ぼす影響等について論じ、さらに、主要な部位である地下外壁の温度応力について言及したものである。

本論文は、全6章及び附章よりなっている。

第1章は緒論であり、蓄熱槽を設ける目的、及び使用温度条件等について述べ、これにより躯体に生ずる温度応力の概念を示した後、本研究の目的と研究範囲を明らかにした。

第2章では、東京都内に建設された蓄熱槽を有する実在の建物について、蓄熱槽を含む地下部躯体の温度を1.4か年にわたって連続して計測し、水温及び地下部躯体の温度の推移を把握した。蓄熱槽は暖房及び冷房用に同一水槽を利用して交互に蓄熱され、水温の平均値は暖房期で40.6℃、冷房期で9.4℃で、1日の変動はともに約10℃以内であった。躯体温度は、基礎スラブ、基礎梁及び地下外壁等主要構造躯体について、軸方向伸縮に寄与する断面平均温度 T_d と、部材の曲げ応力に対応する板厚方向の温度差 T_g についてまとめた。

断面平均温度 T_d の履歴は、地盤に接する度合の大きい部位(基礎スラブ等)ほど、蓄熱開始から最高・最低に達するまでの期間が長く、基礎スラブでは約2~3か月程度であった。応力的に最も検討を要する部位の1つである地下外壁は、蓄熱槽を構成する基礎梁の温度膨張の影響を受け、引張り応力が生じる。その相対温度差 ΔT_d の最大は、断熱材(厚さ50mm)を有する本建家の場合、冬期暖房期で6.7℃程度であることを確認した。

板厚方向温度差 T_g は各部位とも、暖房及び冷房期のシーズン初頭の蓄熱開始直後に最大に

なり、時間の経過とともに減少する傾向を示した。基礎スラブの T_g の最大は 4.2°C （温水蓄熱時）で、ひび割れ発生モーメントに対応する温度差の約 $1/3$ 程度であることが分かった。

第3章では、前章の実測建家について、建家及び地盤を含む2次元FEMモデルによる非定常熱伝導解析を行い、実測結果のシミュレーションと解析手法の妥当性を検証した。実測で得られた水温を与条件とし、実測と同じ1.4か年の解析を行った結果、実測結果と解析結果は概ね一致し、解析的に実測結果を検証し得たと同時に、2次元FEM解析は躯体の温度分布性状を把握する上で有効な手法であることを示した。

第4章では、以上の結果を踏まえ2次元FEM解析により、蓄熱槽の最も基本的な要因である①断熱材の有無及び厚さの違い、②地盤の熱物性値の違い、及び③建設地域の違い等に着目し、躯体温度への影響を明らかにした。

断熱材については、厚さを0、25、50、100mmの4ケースに変え、断熱材厚と躯体温度の関係について検討した。その結果、断熱材は躯体の温度を低減する上で有効で、例えば地下外壁と外周基礎梁の相対温度差 ΔT_d （温水蓄熱時）は、それぞれ 17.0°C （1.0倍）、 10.2°C （0.60倍）、 7.7°C （0.45倍）、 5.5°C （0.32倍）に低下し、断熱材50mm以上を設けることにより、温度荷重を半分以上に低減し得ることがわかった。

また、板厚方向の温度差 T_g は、基礎スラブにおいて、断熱材の無い場合には 24.5°C であるが、断熱材25mmにより 5.4°C に低下し、25mmでもかなりの効果があることを明らかにした。

地盤の熱物性値については、地盤の温度伝播率をパラメトリックに設定して検討した結果、地盤の熱物性値の変動が躯体温度へ及ぼす影響は、ほとんど無視し得るほど小さいことを明らかにした。

以上の検討は、比較的温暖な関東以南を代表する東京地区について行ったが、東北・北海道等の寒冷地を対象として、札幌について同様の検討を行った。両者の違いは、外気温度、地盤の不易層温度、機械室室温、及び暖房期間の長さである。本解析では、さらに建物のライフサイクルを念頭において50年間の非定常解析を行い、長期蓄熱の躯体温度への影響を検討した。その結果、札幌の場合、基礎スラブの断面平均温度 T_d は、東京よりも若干高くなること、及び地下外壁と外周基礎梁の相対温度差 ΔT_d は、暖房期において札幌の方が東京に比べて約1.5倍大きいことなど、設計上留意すべき点を指摘した。

50年間にわたる長期蓄熱運転により、周辺の地中温度は徐々に上昇するが、躯体自体の50年間の温度変動は、断熱材50mmを有する基礎スラブにおいて、札幌で約 4.4°C の上昇、東京で約 1.1°C の上昇（ともに暖房期）にとどまり、寒冷地では長期蓄熱の影響がやや見られるが、温暖地域では影響は少ないことを明らかにした。

第5章では、主要な部位である地下外壁について、弾性応力解析を行うことにより、温度応力の概要、及び断熱材厚と温度応力の関係について検討した。その結果、外壁中央部に生じる水平方向最大引張応力度は、断熱材厚が0、50、100mmに対して、 $\sigma = 21.9\text{kg}/\text{cm}^2$ （1.0倍）、 $11.0\text{kg}/\text{cm}^2$ （0.50倍）、 $8.4\text{kg}/\text{cm}^2$ （0.38倍）に減少し、断熱材50mm以上を設けることにより、温度応力を半減し得ること、及び断熱材を省略した場合にはひび割れの発生の可能性のあることを指摘した。

第6章はまとめであり、本研究で得られた成果と今後の研究課題について述べた。

附章においては、蓄熱槽を導入する際に最も懸念される問題の1つである地下外壁の温度ひび割れについて論じた。地下外壁の温度応力は、断熱材を省略した場合、ひび割れ発生点近傍であり、そのような比較的低下レベルの強制歪を受ける壁板のひび割れ幅の推定法に関しては、十分なデータが有るとは言えない。本附章では、地下外壁を模擬した1軸部材実験を行うことにより、鉄筋量及び鉄筋径とひび割れ幅の関係について定量的に把握し、ひび割れ制御及び温度応力設計法を考える上で有益な知見を得た。

学位論文審査の要旨

主査	教授	石山	祐二
副査	教授	城	攻
副査	教授	荒谷	登
副査	教授	井野	智

学位論文題名

蓄熱槽を有する建物の地下部躯体の 温度分布性状に関する研究

建物の最下部の地下二重スラブ空間に設けられる冷暖房用の蓄熱槽は、地下部躯体に温度応力を生じさせる原因となるが、温度応力の前提となる躯体の温度分布性状についてはこれまでほとんど明らかにされていない。日本建築学会「建築物荷重指針・同解説」においても、温度荷重を検討する必要があるものとして蓄熱槽を上げているが、その具体的な温度荷重及び設定法は示されるに至っていない。

本論文は、蓄熱槽に係る地下部躯体の温度応力設計に資することを目的として、実測及び解析を通じて躯体の温度分布性状を明らかにすると同時に、それによりもたらされる温度応力と温度ひび割れについて論じたものである。以下に審査の要旨について述べる。

① 東京都内に建設された実在の建物について、蓄熱槽水温及び地下部躯体の温度を1年4ヶ月にわたって連続して計測することにより、温度の実態を把握し、さらに、実測建家について、2次元FEMによる非定常熱伝導解析を行い、実測温度と解析結果とを比較し、両者は概ね一致することを示した。このような、温度応力を念頭に置いた地下部躯体の長期にわたる温度実測及び解析を行った例は見当たらず、蓄熱槽による躯体温度を把握する上で意義は大きい。

② 上記①の結果を踏まえ、躯体温度に及ぼす要因として最も基本的な要因である断熱材の厚さ、地盤の熱物性の違いについてFEMによるパラメトリックな数値解析を行い、躯体温度への影響を明らかにした。その結果、断熱材は躯体温度を低減する上で有効で、断熱材50mmを設けることにより、温度荷重を半分程度に低減し得ること、地盤の熱物性の違いの影響は小さいことを明らかにした。このように、従来、経験をベースに設計者の判断に委ねられていた問題について、客観的に論じたのは本論文が初めてであり、その意義は大きい。

③ 本論文ではさらに、我が国の地域的な気温の幅を考慮し、上記の東京の検討に加え、東北・北海道の寒冷地を対象として、札幌についても同様の検討を行い、地下外壁と基礎梁の相対温度差は、暖房期において東京に比べて約1.5倍高くなり、地下外壁の応力の増加が予想されることなど、寒冷地において設計上留意すべき点を指摘している。

④ 主要構造躯体である地下外壁について、2次元FEMによる弾性応力解析を行った結果、断熱材の無い場合にはひび割れ発生の可能性のあること、断熱材50mmにより温度応力は半減し、ひび割れ強度以内に収まることを示し、蓄熱槽に係る温度応力評価上有益な知見を得ている。

⑤ さらに、地下外壁の温度ひび割れを対象として、地下外壁を模擬した部材実験を行うことにより、ひび割れ幅と鉄筋量・鉄筋径の関係について定量的な把握を行い、温度応力に対する配筋設計を行う上で有益な知見を示している。

以上のように著者は、蓄熱槽を有する建物の地下部躯体の温度分布性状に関して有益な新知見を得ており、建築構造学の進歩に寄与するところ大なるものがある。よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。