



地下構造物の熱・湿気性状に関する研究

小椋, 大輔

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2000-09-22

(Date of Publication)

2008-04-02

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2442

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002442>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【271】

氏名・(本籍) 小椋 大輔 (兵庫県)

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

学位記番号 博ろ第206号

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位授与の日付 平成12年9月22日

【学位論文題目】

地下構造物の熱・湿気性状に関する研究

審査委員

主査 教授 森本 政之

教授 川谷 健 教授 森本 正和

助教授 松下 敬幸

近年、地下構造物は都市の土地有効利用や地下空間の持つ有効な特性の利用といった観点から、交通、居住、貯蔵といった多くの利用目的を持って建設されつつある。この空間の持つ有効な特性としては耐震性、防音性といった事の他に、熱環境的には恒温性、高断熱性といった省エネルギーに資する性質を有していることが挙げられる。しかし、一方この空間は一般に夏期の結露、地下水の漏水、高湿度環境といったクリティカルな問題を持っており、またその性状は単純ではない。

地下空間の熱的省エネルギー性を評価するためには、室内熱環境に大きく影響を与える周辺の地盤からの熱移動を適切に評価する必要がある。地盤の熱伝導率や比熱といった熱移動に関係する物性値は土壌の含水状態によって大きく変化するが、その状態は地表面境界の降雨の浸透、蒸発及び地盤内における地下水流動等によって変化する。また水分の蒸発、凝縮といった相変化による熱移動量は大きく、特に地表面境界における降雨後の蒸発潜熱量は大きい。すなわち、地盤内熱移動に関しては、水分移動の影響を適切に評価する必要がある。

地下空間の結露性状、湿度環境は、地盤から壁体を通して流入してくる水分や、換気により室内に持ち込まれる水分の影響を受ける。この水分の移動は水分状態の差によって生ずる以外に温度差によっても生じ、相互に影響しあう。すなわち、結露防止、湿度環境予測を適切に行うには、地盤と躯体との間における熱と水分両方の移動の考慮が必要である。

地下構造物の熱性状に関する研究は多く行われているが、地盤内水分の移動を考慮した研究は少なく、地盤と躯体の間の水分移動を考慮した地下空間の熱・湿気性状に関する研究はこれまで行われていない。そこで本研究では、地盤内水分の考慮及び地盤と躯体との水分移動の考慮した地下構造物の熱・湿気性状を予測する手法を確立することを目的として、上記影響を考慮した解析法を提案し、実験地下室による長期実測を行い、測定結果をこの解析法により解析し予測精度の検討を行い、地盤及び壁体の構成、換気などがこれらに及ぼす影響を明らかにした。さらに熱・湿気環境設計のための簡易予測計算法について提案を行った。

第1章では、地盤を含む多孔質材料中での熱・水分移動に関する研究及び地下構造物の熱性状、湿気及び結露性状に関する研究のレビューを行い、本研究の目的と概要を示した。

第2章では、熱・水分のポテンシャルをそれぞれ温度及び水分化学ポテンシャルとする多孔質材料中の熱・水分移動の基礎方程式を提示した。上式に、地下室内空気の熱・水分収支式を加え、地下構造物の熱・湿気性状予測における基礎方程式とした。

第3章では、第2章で示した基礎方程式中の物性値について、第5章以降の解析で用いる地盤及び壁体に関する値を示した。これら物性は温度や水分化学ポテンシャルといった基礎方程式中の従属変数によって変化するため、基礎方程式は非線形となる。このため本論の解析では、非線形問題の一般的な数値解法である前進型有限差分法を採用し、この差分法が必要となる基礎方程式の差分化式を示した。

第4章では、完全埋設型の実験地下室の温・湿度及び周辺地盤の熱・水分場の年間測定を行った実験の概要、計画、計測方法について述べ、実測から得られた室温・湿度性状、結露性状、周辺地盤の熱・水分性状について考察した。その結果、(1)地下室内温度は年振幅が小さく安定し、相対湿度は春期から夏期にかけて90%を越える高湿な環境となること、(2)地盤内温度は地表面の日射吸収、降雨後の水分蒸発の影響を受けて変動することを示した。

第5章では、第4章で示した地下室温・湿度及び周辺地盤の熱・水分性状を、第2章、第3章で示した解析法を用いて、実測された外界気象条件を境界条件として計算を行い、実測との比較・検討を行った。また、地盤及び壁体の物性値の違いがもたらす影響を検討し、従来の単純熱拡散方程式による解析結果との比較を行った。その結果、本論で示した基礎方程式を用いた解析による計算結果が実測結果と年間を通じて極めて良く一致したことから、これが地下構造物の熱・湿気性状予測に適応可能であることを示した。また、地下室内の湿気性状に対する壁体水分伝導率の影響は大きく、地下室壁体に用いるコンクリートの水セメント比およびその高湿度状態における水分伝導率の値に十分な注意が必要であること、埋設深さ1m程度の地下室内温・湿度環境の予測には地表面近傍の土壌物性値の把握が重要であること、従来の解析法では結果予測ができないことを明らかにした。

第6章では、地盤と地下構造物との間の水分移動に対して大きな影響を及ぼすと考えられる要素として換気回数、壁体防湿層の配置及び常水面深さを考え、これらが地下構造物及び周辺地盤の熱水分性状及び壁体の結露性状に与える影響を検討した。解析対象はコンクリートと防湿層のみ（断熱材及び内装材がない場合）で壁体が構成される完全に埋設された地下構造物であり、室内条件を自然状態として検討を行った。その結果、(1)壁体の室内側表面の水分流は、壁体間の室空気を介した流出入があり、一方向性を示さないこと、(2)壁体防湿層の配置の違い（室内側表面、室外側表面、防湿層なし）が、地下空間の温・湿度に与える影響は大きいこと、(3)壁体の室外側表面に防湿層を設けることが表面結露及び高湿環境を抑えるためには最もよいことから、壁体の吸放湿性を十分もたせ、地盤からの水分流入を抑えることが有効であること、(4)換気量は、小さすぎても大きくても結露防止上問題が生じる事があり、適切な換気量を考慮する必要があることを明らかにした。

第7章では、地下構造物の壁体構成として、より現実的な利用を考慮した構成を考え、地下空間の結露防止において有効となる構成を数値解析により検討した。構造躯体であるコンクリートに断熱材、防湿層、吸放湿材といった材料を用いて壁体構成を変化させ、室内条件は自然状態あるいは居住状態とする解析を行った。その結果、(1)地下空間の結露防止対策において、地盤との境界を断湿することが有効であること、(2)上記に加え、断熱材を配置することは、室内発熱等がある居住状態の場合には、結露防止に有効であることを明らかにした。

第8章では、地下構造物の熱・湿気環境の設計のための簡易計算方法の一手法として、非線形方程式の擬線形化について、それにより求まる線形近似解の精度及び適用範囲の検討を行った。擬線形化法は基準境界条件下における解(基準解)を用いて、基準境界条件からの境界条件変化に対する線形近似解を求め、基準解と線形近似解を重ね合わせることで、任意の境界条件に対する近似解を得ようとする手法であり、この近似解法の検討の結果、(1)外界条件の変化についての適応範囲を明らかにし、外気温、外気相対湿度、日射量、降雨量について日本国内で数カ所程度の外界条件についての解が得られれば、全ての地点で予測できる可能性があること、(2)室温、外気温の単位変化に対する壁面からの熱流の応答を調べ、その時変性が小さいことを確認し、時不変の合成積の利用が可能となることを明らかにした。

第9章では、本研究によって得られた知見をまとめ、今後の課題と展望を述べた。

論文審査の結果の要旨

氏名	小椋 大輔		
論文題目	地下構造物の熱・湿気性状に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	森本 政之
	副査	教授	川谷 健
	副査	教授	森山 正和
	副査	助教授	松下 敬幸
	副査		印
要 旨			
<p>地下構造物は耐震性・防音性・恒温性などの特性により、交通・居住・貯蔵などの利用目的で建設されつつある。一方、地下空間は地下水の漏水や高湿度環境に伴う結露などの問題を有しており、地下空間の利用のためには、これらの問題点の克服が必要である。地下空間の熱・湿気性状を予測、評価するためには、外気の導入の影響や、地盤及び壁体の熱伝導率や比熱などの熱的物性値の水分条件による変化を考慮する必要がある。これらには降雨や地表面での熱・水分の移動など種々の要因が</p>			

関係しているが、その性状の理解が十分に行われているとは言い難い。本研究は、地下空間の熱・湿気性状の予測法の確立と工学的設計手法の提案を目的として、使用する基礎方程式の検討とその妥当性の確認を行うとともに、地上の気象条件や地盤及び壁体の構成、換気などが地下空間内に及ぼす影響を検討したものである。

第1章で、地盤を含む多孔質材料中での熱・水分移動と地下構造物の熱・湿気性状に関する従来の研究のレビューを行い、地下構造物と地盤との間の水分移動の重要性が指摘されているにもかかわらず、熱・水分同時移動問題としての取り扱いが不十分であることを示している。

第2章で、地盤及び地下構造物壁体における熱・水分同時移動問題における構成式を検討し、温度及び水分化学ポテンシャルを用いた取り扱いが適していることを示している。

第3章で、第2章で構成した基礎方程式を地下構造物及び地盤に適用するときの物性値について検討し、物性値の温度及び水分化学ポテンシャルへの従属性とその取り扱いを示している。また、非線形の基礎方程式を数値的に解くための前進型有限差分式を示している。

第4章で、実験地下室を用いて、地下室内の温度・湿度性状や地下水位を含めた地盤内の熱・水分性状を実測し、年間を通しての地下室の熱・湿気環境を把握している。同時に、ボーリング調査により実験地下室を取り巻く地盤の地質を確認している。この実測により、(1)地下室内部温度は年振幅が小さく安定しているが、春期から夏期にかけて相対湿度90%以上の高湿度環境になること、(2)地盤内温度が地表面での日射や降雨の影響を強く受けること、などの結果を得ている。

注：1000～2000字でまとめること。

第5章で、第4章の実験地下室を対象として、第2、3章で提示した解析法の妥当性を検証している。実験地下室を取り巻く地上の外界気象条件及び地下水位を与条件とした計算を行い、実験地下室内及び地盤内部の温度・湿度性状の実測値と計算値とが極めて良く一致したことから、本論文での基礎方程式が地下構造物の温度・湿度環境予測に適用できることを確認している。また、地盤及び地下室壁体の物性値の違いが結果に及ぼす影響を検討し、コンクリートの物性値や土壌の構成の適切な取り扱いが必要であることを示している。

第6章で、地下構造物の換気回数、壁体防湿層の配置、常水面深さが変化したときの地下構造物及び周辺地盤の熱・水分性状に与える影響を、数値解析により検討している。その結果、(1)地下構造物の壁体では地盤と室との間で両方向の水分流があること、(2)換気回数は少なすぎても多すぎても地下室内の結露防止には問題があり、適切な換気量を考慮する必要があること、(3)常水面が地下構造物の床下地盤よりも深ければ常水面位置が結果に及ぼす影響は小さいこと、などを確認している。

第7章で、地下空間内部での結露防止に有効な壁体構成を検討するために、断熱材、防湿層、吸放湿材の貼付による影響を数値解析により検討している。その結果、(1)壁体の地盤側境界で断湿すること、(2)断湿に加えて断熱すること、が結露防止に有効であることを示している。

第8章で、設計のために有用な地下構造物内の熱・湿気性状の簡易予測計算法として、非線形方程式の擬線形化を行い、その精度と適用範囲の検討を行っている。その結果、外気温、相対湿度、日射、降雨につい

て日本国内で数カ所程度の外界条件が用意されれば、すべての地点で予測できる可能性を示している。

本研究は、地下構造物内部の温度・湿度環境の予測法について、熱・水分同時移動方程式を基礎式として用いることの妥当性を実験地下室による実測値との比較によって確認するとともに、地盤及び壁体の熱・水分物性の取り扱い、常水面位置や換気が結果に及ぼす影響を数値解析によって研究し、さらに設計のための簡易予測計算法の提案を行ったものであり、地下構造物の熱・湿気性状の予測法について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者 小椋大輔は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。