

## 学位論文題名

## 舗装材料中の水分の移動・蓄積機構に関する研究

## 学位論文内容の要旨

不透水性とされる材料でも水が内部に存在することがある。土木構造物においても、意外な箇所に水分が存在し滯水しているのが見つかり、その水分が構造物の耐久性を低下させていることからその原因について議論となっている。

家屋等の建築物、機械等の部品や筐体、衣類等の繊維材料、ビニルシート等の包装資材など、水の浸入を防止あるいは積極的に制御することに古くから取り組んできた技術分野では、水分の物質移動に関する基礎的研究事例も多く知見も定まりつつある。これらの知識を活用して、室内の湿度を調節するような建材や、水蒸気は透過するけれども水は通さない布など、透水性や透気性を積極的にコントロールするような材料技術も発達してきている。

一方、土木分野、とくに舗装材料や橋梁構造材料においては、全体として水を排除することが長寿命化につながるものと考えられてきており、排水性舗装等の新たな機能性舗装を除き、とにかく“密な”材料を設計して使用することで耐久性を確保しようとする考えが基本に置かれてきたと言える。しかしながら、完全な水分の排除は困難であり、水分による構造物損傷は依然として大きな問題である。舗装をはじめとした社会資本を、合理的かつ有効に保全するためには、舗装材料中の水分の移動・蓄積機構を明らかにすることがまず必要である。

本論文では、アスファルト舗装に生じる水分の物質移動現象、特に浸入と蓄積機構に焦点を当て、既往の知見をもとに仮説を立て、実験検討により検証した。水蒸気による水分移動の検証には、温湿度の時間変化と結露を再現できる試験装置を考案し改良を進めて活用し、その有用性を示した。これらの成果に基づき、舗装材料中の水分の移動・蓄積機構を解明するとともに、水分に関連した損傷に対する設計の考え方を提言した。

第1章は序論であり、本論文の背景と目的、および既往の研究と当面する課題、本論文の構成について述べた。

第2章では、アスファルト混合物内の水分の移動・蓄積に関するメカニズムについて検討を行い、現象を根拠づけるための仮定として提起し、実験検証の項目を整理した。

第3章では、透水/透気現象にかかる選択性や不可逆性について実験を行った結果、アスファルト混合物には「透気-不透水」となる細孔構造の材料条件が存在することを明らかにした。大阪空港の滑走路から採取した試料や室内で作製した様々な試験体の透水/透気試験から、表層の透水係数が特定のしきい値以下の場合液体の水は透過できなくなることを確認し、さらに湿潤空気による透気係数を調べることにより、たとえ表層が実質的に不透水であっても、大気中の水分が水蒸気としてそのアスファルト混合物中を透過することを示した。透気性状について更に検討を加えた結果、透気係数は透過流体である湿潤空気の温湿度により変化するため、夜間には水蒸気が透過しやすく昼間には透過しにくくなる効果があることを明らかにした。さらに、アスファルト混合物内の

細孔内に浸透し凝縮した水分は水蒸気透過を阻害する空隙構造の封止効果を有することから、湿潤時には透気係数が低下することを見いだした。そして、X線CT解析による空隙構造の解析により、内部の空隙が細かいほど水分による細孔の封止効果が強く、空隙の質が透気係数の低下と関連することを裏付けた。また、透水係数と透気係数は、不透水となる場合を除いて相互に換算可能であることも確かめた。

第4章では、ブリスタリングの発生した箇所の材料の透水/透気性状について実験を行った結果から、ブリスタリングが発生するための透過性状のしきい値を明らかにした。大阪空港でブリスタリングによる損傷の発生箇所近傍とそこから離れた場所から採取した試料の透水/透気係数から、ブリスタリング現象は、表層の透水係数があるしきい値(おおよそ10-6cm/sec)以下の場合に発生することがわかった。その理由として、液体の水が透過できなくなるために細孔内の間隙水となって残留することを指摘し、これが気体の透過をも阻害するためにブリスタリング現象を引き起こすことを明らかにした。つまり、第3章の知見とあわせて、たとえ表層が実質的に不透水であっても、大気中の水分が水蒸気としてそのアスファルト混合物中を透過することにより水分の移動が生じ、移動できない間隙水として蓄積しうることを見いだした。これに関連して、透水/透気係数は当初の混合物性状ばかりでなく、交通荷重による圧密により変化することを確認した。

第5章では、水蒸気による水分の移動・蓄積機構を実験的に検証するため、舗装の現場環境条件を再現する透湿試験装置を開発して実験した。その結果、路面付近での大気の温湿度や舗装内温度分布の時間的変化により、不透水なアスファルト混合物を水分が透過して蓄積することを実証した。アスファルト舗装混合物は、不透水性であってもかなりの量の水分を水蒸気の吸放出として“呼吸”していることが明らかとなった。本研究で開発した透湿試験方法は、アスファルト混合物の透湿性状の評価に有効な方法であることを示した。

第6章では、環境変化の繰返しによる影響と、水分移動に連行する化学物質の移動現象について検討を加えた。第5章で環境条件の動的な変化により水分が蓄積することを示したが、本論文では、長期間の繰返しにより滞水量が増加することも水分蓄積の要因として挙げている。橋面舗装の試験体としてコンクリート床版上に施工された舗装を用いて、繰返し透湿試験を行った結果、アスファルト舗装は環境変化の繰返しのなかで吸放湿により毎日呼吸しており、その水分蓄積量は気象環境の変化周期と同期して変動することがわかった。繰返し透湿作用により橋面舗装まわりの水分蓄積量は増加し、一日あたりの量は僅かであっても気象条件によっては滞水量がかなり大きなものとなることを示した。水分移動に連行する物質移動を調べたところ、舗装表面に塗布された界面活性剤(アルキルフェノールエトキシレート型)が、繰返し透湿試験中に不透水層である舗装を透過しコンクリート床版中に蓄積することを見いだした。さらに、舗装混合物中のアスファルトあるいはその一部成分も、透湿試験における水分及び界面活性剤の物質移動に伴って移動しコンクリート床版に蓄積することを明らかにした。

第7章は結論であり、本論文で得られた主な知見を総括するとともに、今後の課題を整理し、水分に関連した損傷に対する設計の考え方について提言を行った。

# 学位論文審査の要旨

主　査　教　授　恒　川　昌　美  
副　査　教　授　名　和　豊　春  
副　査　教　授　松　藤　敏　彦  
副　査　准教授　広　吉　直　樹

## 学位論文題名

### 舗装材料中の水分の移動・蓄積機構に関する研究

土木分野、とくに舗装材料や橋梁構造材料においては、全体として水を排除することが長寿命化につながるものと考えられており、排水性舗装等の新たな機能性舗装を除き、できるだけ“密な”材料を設計して使用することで耐久性を確保することが基本となっている。しかしながら、完全な水分の排除は困難であり、水分による構造物損傷は依然として大きな問題となっている。そのため、舗装をはじめとした社会資本を、合理的かつ有効に保全するうえで、舗装材料中の水分の移動・蓄積機構を明らかにすることが重要となってきているが、この課題に取り組んだ研究例は少ない。

本研究では、アスファルト舗装に生じる水分の物質移動現象、特に浸入と蓄積機構に焦点を当て、既往の知見をもとに仮説をたて、実験により検証した。水蒸気による水分移動の検証には、温湿度の時間変化と結露を再現できる試験装置を考案、改良し、その有用性を示した。これらの成果に基づき、舗装材料中の水分の移動・蓄積機構を解明するとともに、水分に関連した損傷に対する設計の考え方を提言した。本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり、以下のように7章から構成されている。

第1章は序論であり、本論文の背景と目的、および既往の研究と当面する課題、本論文の構成について述べている。

第2章では、アスファルト混合物内の水分の移動・蓄積に関するメカニズムについて検討を行い、現象を実証するための仮定を提起し、実験検証の項目を整理している。

第3章では、透水/透気現象にかかる選択性や不可逆性について実験し、その結果からアスファルト混合物には「透気-不透水」となる細孔構造の材料条件が存在することを明らかにしている。すなわち、大阪空港の滑走路から採取した試料や室内で作製した様々な試験体の透水/透気試験から、表層の透水係数が特定のしきい値以下の場合液体の水は透過できなくなることを確認し、さらに温潤空気による透気係数を調べることにより、たとえ表層が実質的に不透水であっても、大気中の水分が水蒸気としてそのアスファルト混合物中を透過することを見出した。透気性状について更に検討を加えた結果、透気係数は透過流体である温潤空気の温湿度により変化するため、夜間には水蒸気が透過しやすく昼間には透過しにくくなる現象が起こることを明らかにした。さらに、アスファルト混合物内の細孔内に浸透し凝縮した水分は水蒸気透過を阻害する空隙構造の封止効果を有する

ことから、湿潤時には透気係数が低下することを示した。また、X線CT解析による空隙構造の解析から、内部の空隙が細かいほど水分による細孔の封止効果が強く、空隙の性状が透気係数の低下と関連することを裏付け、透水係数と透気係数は、不透水となる場合を除いて相互に換算可能であることを確かめた。

第4章では、ブリスタリングの発生した箇所の材料を用いて実験し、その透水/透気性状について検討した結果から、ブリスタリングが発生するための透過性状のしきい値を明らかにしている。大阪空港でブリスタリングによる損傷の発生箇所近傍とそこから離れた場所から採取した試料の透水/透気係数に基づき、ブリスタリング現象は、表層の透水係数があるしきい値(おおよそ10-6cm/sec)以下の場合に発生することを示した。その理由として、液体の水が透過できなくなるために細孔内の間隙水となって残留することを指摘し、これが気体の透過をも阻害するためにブリスタリング現象を引き起こすことを明らかにした。この結果と第3章の知見から、たとえ表層が実質的に不透水であっても、大気中の水分が水蒸気としてそのアスファルト混合物中を透過することにより水分の移動が生じ、移動できない間隙水として蓄積することを見いだした。これに関連して、透水/透気係数は当初の混合物性状ばかりでなく、交通荷重による圧密により変化することも確認した。

第5章では、水蒸気による水分の移動・蓄積機構を検証するため、舗装の現場環境条件を再現する透湿試験装置を開発して実証実験を行っている。その結果、路面付近での大気の温湿度や舗装内温度分布の時間的变化により、不透水なアスファルト混合物を水分が透過して蓄積することを確かめた。アスファルト舗装混合物は、不透水性であってもかなりの量の水分を水蒸気の吸放出として“呼吸”していることを明らかにした。本研究で開発した透湿試験方法は、アスファルト混合物の透湿性状の評価に有効な方法であることを示した。

第6章では、周期的な環境変化の影響と、水分移動に伴う化学物質の移動現象について検討している。第5章で環境条件の動的な変化により水分が蓄積することを示したが、本章では、長期間の環境変化の繰返しにより滞水量が増加することも水分蓄積の要因であることを示した。橋面舗装の試験体としてコンクリート床版上に施工された舗装を用いて、繰返し透湿試験を行った結果、アスファルト舗装は環境変化の繰返しのなかで吸放湿により毎日呼吸しており、その水分蓄積量は気象環境の変化周期と同期して変動することがわかった。繰返し透湿作用により橋面舗装まわりの水分蓄積量は増加し、一日あたりの量は僅かであっても気象条件によっては滞水量がかなり大きなものとなることを明らかにした。水分移動に伴う物質移動を調べたところ、舗装表面に塗布された界面活性剤(アルキルフェノールエトキシレート型)が、繰返し透湿試験中に不透水層である舗装を透過しコンクリート床版中に蓄積することを見いだした。さらに、舗装混合物中のアスファルトあるいはその一部成分も、透湿試験における水分及び界面活性剤の物質移動に伴って移動し、コンクリート床版に蓄積することを確かめた。

第7章は結論であり、本論文で得られた主な知見を総括するとともに、補足として今後の課題を整理し、水分に関連した損傷に対する設計の考え方について提言している。

これを要するに、著者はアスファルト舗装材料中で生じる水分の物質移動現象、特に浸入と蓄積機構について、新たに考案した試験装置、方法によりを解明するとともに、水分に関連した損傷に対する設計の考え方を提言しており、道路工学の発展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。