

学位論文の要旨

氏名

樋原 弘貴

学位論文題目

コンクリート用表面含浸材の材料特性と劣化抑制効果に関する
基礎的研究

構造物を造って捨てる時代から造って使いこなす時代へと社会は変化し、構造物のコストもイニシャルコストからライフサイクルコストで評価される時代へと変わってきている。その一方で、近年、コンクリート構造物において数年から十数年で劣化が生じる早期劣化が問題となっており、その維持管理は重要課題となっている。このため、今後は、新設、既設の如何にかかわらずコンクリート構造物において耐用年数が長くなるような新たな手立てを施しておくことが社会要請として益々強まるであろうと予想される。そして、このような状況の中、コンクリート構造物の性能回復手法の1つとして、様々な劣化に対し適用可能性を有する表面含浸材を用いた工法の開発・研究が行われ始めている。この工法は所定の量の含浸材をモルタルやコンクリート表面に塗布するだけであり、作業性やコストパフォーマンスにも優れている。ただし、現状では、その性能を定量的に評価するまでには至っていない。

そこで本論文では、まず、モルタルあるいはコンクリート内部への表面含浸材の浸透特性や改質効果を定量的に評価するとともに、塩化物イオンや二酸化炭素などの劣化因子の侵入抑制効果を検討してこの材料の適用範囲を明確にした。また、この工法が実施工にされた場合の性能確認方法について、提言を行った。本論文は、以下に示すように9章からなる。

第1章では、表面含浸材が使用されるようになった経緯を示し、その有効性あるいは問題点を挙げた上で、本研究の背景と目的について概説した。

第2章では、各種表面含浸材の性能や劣化抑制メカニズムを示すとともに、既往の研究で得られている結果を踏まえて、明らかになっている点と不明な点について記した。

第3章では、表面含浸材の主成分としてNaが含まれることから、この材料を使用することによるアルカリシリカ反応（以下、ASR）の促進可能性について検討を行った結果を示した。すなわち、ここでは、反応性骨材を使用したモルタルバー試験により、ASRに及ぼす表面含浸材の影響について実験的検討を行い、以下の点を明らかにした。

- ・ 表面含浸材を塗布することでコンクリート表層のアルカリ量は増加するものの、モルタルの配合や養生環境条件の如何にかかわらず、いずれの条件でも含浸材がかえってASRを抑制する結果となった。
- ・ 表面含浸材によるASR抑制効果は、ASR発生に必要な水分の侵入を抑制したことによるものと考えられた。

第4章では、表面含浸材のコンクリート内部への浸透に影響する主要因として、コンクリートの水セメント比および含水率を取り上げ、これらの要因をパラメータとし実験を行い、表面含浸材のコンクリート内部への浸透性と改質特性について定量的に評価した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ 細孔溶液中のpHによって結晶生成量に違いが見られ、表面含浸材と Ca^{2+} との間に最適な反応割合が存在する。
- ・ 表面含浸材の主成分である Na^+ ならびに、含浸材と反応してC-S-H結晶を生成し組織のち密化に寄与するコンクリート中の Ca^{2+} を測定することで、浸透深さおよび改質の程度を定量的に評価できることを示した。また、その結果として、浸透深さは水セメント比および塗布時のコンクリート含水率が高いほど大きいものの、改質効果は、水セメント比が低いほど大きいことが明らかとなった。

第5章では、予防保全および事後保全的に表面含浸材が施工された場合をそれぞれ想定し、含浸材塗布後のコンクリートの中性化や塩化物イオンに対する劣化抵抗性について促進試験および屋外曝露実験により検討を行なった。その結果、以下の点が明確になった。

- ・ 予防保全的に表面含浸材を塗布した場合には、促進試験および曝露試験において、中性化および塩化物イオンに対する劣化抑制効果が確認され、また、その結果は、第4章においてコンクリート内部の改質程度を評価した結果と一致した。
- ・ 既に塩害環境に曝され、塩化物イオンが浸透しているような既設構造物に事後保全的に含浸材を塗布した場合には、含浸材の浸透が及ばないコンクリート内部で、残存塩化物イオンの移動の影響を考慮する必要があることが示唆された。
- ・ 中性化している既設構造物に事後保全的に含浸材を塗布する場合には、中性化の遷移域での再アルカリ化は確認されたが、含浸材の塗布が組織の緻密化などの品質改善にはつながらない可能性があることが明らかとなった。

第6章では、表面含浸材でひび割れを補修する場合の補修方法、補修可能なひび割れ幅、ならびに最適な補修時期などについて、ひび割れからの止水効果および劣化因子侵入の抑止効果の観点から検討を行い、以下の知見を得た。

- ・ ひび割れに直接注入を施すことにより、無補修供試体に比べて、透水係数が2~3オーダー程度の低減し、止水効果があることが分かった。また、ひび割れ内に生成されたゲルはコンクリートと一体化し強固なものとなっていた。
- ・ 止水効果は少なくとも3年間は変化しておらず、その効果は今後も持続するものと考えられた。
- ・ 中性化しているひび割れに対しては、含浸材による遮水効果が得られ難い。ただし、このような場合でも、含浸材の反応に必要な Ca^{2+} をあらかじめ含浸材に付与させてゲル化したものをひび割れに注入することで、遮水効果を得られることを確認した。
- ・ 酸性雨環境や塩害環境下において、ひび割れからの劣化因子の侵入を抑制する結果を示し、ひび割れ幅 0.1mm 程度までは、劣化因子の侵入がひび割れなし供試体と同程度となった。

第7章では、表面含浸材が施工された構造物の性能評価手法に関する検討結果を示した。すなわち、表面含浸材は無色透明であるために、施工が適切に実施されたことを確認することが難しい。また、施工後の構造物の性能評価を行う手法も確立されていない。ここでは、その評価指標として透気性に着目し、表面含浸材によるコンクリート表層の品質改善が透気性に与える影響について実験的に検討を行い、以下の知見を得た。

- ・ 配合や養生条件が異なるコンクリートに含浸材を塗布した場合、いずれの条件においても、無塗布供試体に比べて透気性が低下することを確認した。
- ・ 含浸材を塗布した場合においても、中性化深さと透気係数との間に明確な相関が確認でき、透気係数を指標とすることで、劣化予測も可能であることが明らかとなった。

第8章では、表面含浸材としての成分やその量が異なる6種類の材料を用いて、これらを塗布したコンクリートの吸水抑制効果ならびに、乾燥収縮、中性化ならびに塩化物イオン浸透に対する抵抗性について検討を行い、表面含浸材の種類の違いが、コンクリートの劣化抑制効果に及ぼす影響を定量的に評価することを試みた。その結果、以下のことが明確になった。

- ・ いずれの含浸材においても、コンクリートの材齢28日で塗布した場合には改質効果が確認され、また、含浸材種類による違いやバラツキは小さかった。しかし、コンクリートの材齢7日で塗布した場合には、いずれも明確な効果は確認できず、表面含浸材の種類によっては、かえってコンクリートの吸水性や乾燥収縮が大きくなるものもあり、これらのことから、含浸材の適用範囲は、塗布時のコンクリートの状態や含浸材の成分配合条件によって異なることが明確となった。

第9章は、結論として本研究の得られた成果を取り纏めるとともに、表面含浸材の効果や最適な施工時や工法について言及し、留意点をまとめた。最後に今後の課題を提示することで本論文の結びとした。

論文審査の要旨

報告番号	理工研 第318号	氏名	樋原 弘貴
審査委員	主査	武若 耕司	
	副査	北村 良介	山口 明伸
		松本 進	

学位論文題目： コンクリート用表面含浸材の材料特性と劣化抑制効果に関する基礎的研究
(Fundamental Study on Properties of Surface Improvement Material and Its Prevention Ability against Deterioration of Concrete)

審査要旨

提出された学位論文および論文目録等を基に学位論文審査を実施した。本論文は、9章より構成されている。第1章は、序論であり、本研究の背景と目的について概説している。

第2章では、各種含浸材の性能や劣化抑制メカニズムを示すとともに、既往の研究で得られている結果を踏まえて、明らかになっている点と不明な点について記した。

第3章では、含浸材の主成分としてNaが含まれることから、この材料をコンクリートに使用することによるアルカリシリカ反応（以下、ASR）の促進可能性について検討を行い、その結果、含浸材を塗布することでコンクリート表層のアルカリ量は増加するものの、モルタルの配合や養生環境条件の如何にかかわらず、含浸材はASR発生に必要な水分の侵入を抑制することから、かえってASRを抑制することを明確にした。

第4章では、コンクリート内部への含浸材の浸透に影響する主要因として、コンクリートの水セメント比および含水率を取り上げて実験的検討を行い、含浸材浸透深さは水セメント比や塗布時の含水率が高い程大きいものの、改質効果は、水セメント比が低い程大きいことを明らかにした。またこの検討から、含浸材と浸透個所のCa²⁺との間に最適な反応割合が存在することならびに、コンクリート中のNa⁺およびCa²⁺の濃度分布を測定することで、含浸材の浸透深さと改質範囲を定量的に評価できることを示した。

第5章では、予防保全あるいは事後保全的に含浸材が施工された場合を想定し、含浸材塗布後のコンクリートの中性化や塩害に対する劣化抵抗性を促進試験および屋外曝露実験により検討し、予防保全的に含浸材を塗布した場合にはこれらの劣化に対する明確な抑制効果を示すものの、既に劣化が進行している構造物に事後保全的に適用した場合には、含浸材の塗布が必ずしも劣化抑制に繋がらない場合があることを明らかにした。

第6章では、ひび割れ補修に含浸材を用いる場合の適用方法、補修可能なひび割れ幅、最適な補修時期などを、漏水あるいは劣化因子侵入に対する抑止効果の観点から検討を行い、ひび割れに含浸材を注入することで、無補修供試体に比べて透水係数が2~3オーダー低減すること、酸性雨環境や塩害環境下においてひび割れからの劣化因子の侵入を抑制できること、中性化しているひび割れ部の改善は含浸材単独では図れないこと等を確認した。

第7章では、含浸材施工後の構造物における現場での性能評価手法に関する検討を行った。ここでは、その指標として透気性に着目し、含浸材によるコンクリート表層の品質改善が透気性と密接な関連があることを定量的に示し、また、現場透気性試験結果から、中性化による劣化の将来予測が可能であることを明らかにした。

第8章では、化学成分やその量が異なる6種類の含浸材について、複数の劣化抑制効果を検証し、その結果から、含浸材の性能が、塗布時のコンクリートの状態や含浸材の成分配合条件によって異なることを明確にした。

第9章では、結論として本研究の得られた成果を取り纏めるとともに、含浸材の効果や最適な施工時期や施工方法について言及し、最後に今後の課題を提示することで本論文の結びとした。

以上、本論文は、実用化が先行し、未だコンクリートの改質メカニズムが明確でないばかりか、最適な材料設計方法や施工方法さえも確立されていないケイ酸塩系表面含浸材を研究テーマとして、多角的かつきめ細かな実験を精力的に行い、その成果を適切に整理・検証することで、含浸材のコンクリート中への浸透・改質範囲を定量的に把握する手法を提案するとともに、コンクリート構造物の品質向上あるいは補修としてこれを適用する場合の有効性と適用限界について明確に示した。これらの成果は、実務上有益な情報となるのみならず、工学的にも極めて意義あるものである。よって、審査委員会は、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と判定する。

最終試験結果の要旨

報告番号	理工研 第318号	氏名	樫原 弘貴
審査委員	主査	武若 耕司	
	副査	北村 良介	山口 明伸
		松本 進	
<p>平成22年2月10日（水）に論文発表会が開催され、約1時間の説明の後、約40分間の活発な質疑応答が発表者と4名の審査委員を含む51名の参加者の間でなされ、的確な回答が得られた。主な質疑応答の内容を以下に記す。</p> <p>【質問】本論文中で示されている表面含浸材を塗布したコンクリートの透水係数の持つ意味は何か。また、これを理論的に求めるための方法は導き出せないのか。</p> <p>【回答】透水試験では、含浸材が浸透した個所と含浸材が行き渡っていない個所が混在した状態での平均的な値としての透水係数が測定される。したがって、含浸材を塗布した個所と塗布していない個所を区別して定量的に評価することはできていないが、このことが、実際の構造物に塗布した際のコンクリートの透水性を評価するうえでは問題となることはないと考えている。また、本研究では、表面含浸材を塗布したコンクリートにおける透水性を理論解析などで評価するまでには至らなかったが、今後取り組みたい。</p> <p>【質問】室内促進実験結果では、表面含浸材はアルカリ骨材反応を促進しないとの結果を得ているが、そのことを実環境での曝露実験などで確認しているのか。また、アルカリ骨材反応を抑制するということであるならば、表面含浸材はこの抑制対策としても、もっとPRしてもよいのではないか。</p> <p>【回答】促進試験と同時に屋外曝露実験も実施している。まだ1～2年程度の試験期間ではあるが、これまでのところ促進試験と同様に、劣化が促進される状況は認められず、かえって幾分抑制されている状況が確認されている。ただし、個人的には、明らかにアルカリ骨材反応による劣化が発生している構造物において本工法を対策工法として積極的に使用することは考えていない。その理由は、本工法によって完全に水を遮断することは難しい一方で、劣化促進要因であるNaイオンは確実に増えることになるからである。</p> <p>【質問】中性化が生じたコンクリートでは表面含浸材の改質効果は期待できないとの説明だが、この材料を補修に使用する場合、予防保全的な補修であってもコンクリート表層部にある程度の中性化が進行していることは否めない。この様に考えると本工法は、新設の構造物にしか使用できないことになるが、どうか。</p> <p>【回答】少しでも中性化が生じている構造物では表面含浸材が使用できないということではない。ただし、中性化の状況に応じて適切な量の含浸材を塗布しないと、十分な改質効果は期待できない。例えば、中性化が進行しているからといって、含浸材の塗布量を増加させると、かえって抑制効果が低下する可能性があることは、本論文において、含浸材量が多すぎても、また反応相手のコンクリート中のCaイオンが多すぎても、改質効果は低下する結果が得られていることから明らかである。</p> <p>【質問】含浸材を構造物に施工後、構造物表面の透気係数を測定することで含浸材の塗布効果を確認できることであるが、その測定結果はコンクリート表面の含水状態に依存するのではないか。</p> <p>【回答】コンクリート内部の含水量を直接測ることはできないが、簡易的に表面含水率を測定できる装置があるので、その測定結果を基に透気係数の測定結果を補正することである程度は対応できると考えている。</p> <p>【質問】本論文で対象とした表面含浸工法の位置図付けについて教えてほしい。すなわち、このような材料は、サプリメント的に使用するのが最も適切ではないかと考えるが、どうか。</p> <p>【回答】手軽に施工できるという観点では確かにサプリメント的と言えるかもしれない。しかし、技術的なノウハウを持っていなくても誰でも塗れるというものではないと考えている。適切な効果を発揮させるためには、それなりの知識と技術が必要であり、これが、この材料の信頼性向上にもつながると考えている。</p> <p>以上も含めた10件の質疑に対する応答から、4名の審査委員は、申請者が大学院博士後期課程修了者として十分な学力と見識を有するものと認め、博士（工学）の学位を与えるに足る資格を有するものと判定した。</p>			