

令和 2 年 4 月 22 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06518

研究課題名（和文）ハイブリッド被膜養生剤の長期耐久性向上効果に関する研究

研究課題名（英文）A Study on the Long-term Durability of Hybrid Curing Agent

研究代表者

呉 承寧（Wu, Chengning）

愛知工業大学・工学部・特命教授

研究者番号：90609405

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、養生機能と耐久性向上機能を兼備するハイブリッド被膜養生剤の耐久性向上効果の長期持続性において、実験室内の促進劣化試験と厳しい自然環境での暴露試験を行い、耐久性向上効果の長期持続性を確認し、さらに、室内促進劣化試験の結果と自然環境で暴露した試験体の劣化状況との相関関係から、塗布したコンクリート構造物の耐久性設計および維持管理に必要な基礎データを収集した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の単一機能の被膜養生剤または含浸材と異なり、養生機能と耐久性向上機能を兼備する新型ハイブリッド被膜養生剤を開発し、その耐久性向上効果の持続限界を予測する技術を確立し、ハイブリッド被膜養生剤を塗布したコンクリート構造物の耐久性設計と維持管理に必要な基礎データが提供し、コンクリート構造物の早期劣化の社会問題を効率よく解決することに貢献する。

研究成果の概要（英文）：In this research, the accelerated deterioration tests in laboratory and experiments exposed in severe natural environment were carried out to confirm the improving effects of the hybrid curing agent to durability of concrete in long term. According to the relationship between the results of the accelerated deterioration tests in laboratory and experiments exposed in severe natural environment, the data was collected for durability design of concrete structure and maintenance.

研究分野：建設材料

キーワード：ハイブリッド被膜養生剤 養生機能 耐久性向上機能 持続性 室内促進劣化試験 自然環境暴露試験

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、コンクリート構造物の早期劣化は、構造物安全性の確保、修復の困難性、構造物の使用制限、および巨額な補修費用などの面で大きな社会問題となっており、早期に解決する必要がある。

(2) コンクリート構造物の耐久性を向上するために、鉄筋を保護するかぶりコンクリートの緻密化または表層部コンクリートの撥水化によって、外部からの有害物質の浸透を抑制し、鉄筋を保護する技術が注目されている。例えば、国内外では次の技術を使用している：①湿潤養生が困難なコンクリートの表面に水分逸散抑制機能を持つ被膜養生剤の塗布によってかぶりコンクリートを養生し緻密化させる技術、②コンクリート表層部を緻密させるケイ酸塩系含浸材、コンクリート表面に撥水機能を与えるシラン系含浸材などの塗布によって、外部からの侵食物質の浸透を抑制する技術がある。しかし、これらの技術は、①それぞれの目的で開発されたものであるため、一度の塗布作業で養生効果および耐久性向上効果の両方を得ることはできない、②被膜養生剤が塗布されたコンクリートの表面に含浸材が含浸しにくいなど、いくつかの問題が未解決のままとなっている。

(3) 従来技術の問題を解決するために、本研究の前期の研究で養生機能と耐久性向上機能を兼ね備えるハイブリッド被膜養生剤（以下はCB養生剤と略称）を開発し、コンクリートの表面にCB養生剤を塗布することによって、コンクリートの表層部にCB養生剤を浸透させ、コンクリートに対する初期の養生効果と長期の耐久性向上効果を同時に得ることを確認した。これまでの研究で、CB養生剤の養生効果と耐久性向上効果が実験室レベルで確認した。しかし、CB養生剤の耐久性向上効果の長期持続性に関する検討は十分ではないのが現状である。

### 2. 研究の目的

(1) CB養生剤の実用化のために、CB養生剤の耐久性向上効果の長期持続性に関する検討は不可欠であり、本研究は、実験室内の促進劣化試験と厳しい自然環境での暴露試験と組合せ、比較的短期間でCB養生剤の耐久性向上効果の長期持続性を確認し、塗布したコンクリート構造物の耐久性設計および維持管理に必要な基礎データを収集することにした。具体的に、研究期間中に下記のことを明らかにする。

#### ① CB養生剤の耐久性向上効果の経年低下と環境条件との関係

CB養生剤を塗布したコンクリート試験体に対して、キセノンランプ法による耐候性促進試験や、熱冷繰返し抵抗性試験、中性化促進試験、およびASR促進試験などの室内促進劣化試験、および厳しい自然環境（都市部中性化環境、海岸部の塩分浸透環境）での暴露試験を行い、定期的にコンクリートの透水性、中性化、塩化物イオン浸透、およびASRなどの耐久性関連項目を測定し、CB養生剤の耐久性向上効果の経年低下と環境条件との関係を明らかにする。

#### ② CB養生剤の耐久性向上効果の持続限界と予測方法

上記①の結果に基づき、室内促進劣化試験を受けた試験体から算出した中性化速度係数や、塩化物イオンの見掛け拡散係数、およびASRによる膨張率などの耐久性特性値と厳しい自然環境で暴露した試験体の測定結果から算出した耐久性特性値との相関関係を調べ、CB養生剤の耐久性向上効果の持続限界および予測方法を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 室内促進劣化試験によるCB養生剤の耐久性向上効果の持続限界の解明

CB養生剤の耐久性向上効果の持続限界を解明するために、有機材料の耐候性を調べるキセノンランプ法による室内促進劣化試験、および熱冷繰返し抵抗性試験によって比較的短期間に、各種の改良CB養生剤の耐久性向上効果の持続性を調べる。CB養生剤を塗布した試験体の促進試験前後の耐久性を調べ、比較的耐久性持続性の高いCB養生剤を選定し、厳しい自然環境の暴露試験に使用する。

試験の概要：

#### ① 試験用被膜剤と試験体の種類

試験に使用した被膜剤は、表-1と写真-1に示す6種類であり、各被膜剤の塗布量はコンクリート試験体の表面積で150 g/m<sup>2</sup>とした。

試験体の種類は、6種類の被膜剤をそれぞれ塗布した試験体と比較するための被膜剤無塗布の試験体、計7種類とした。

#### ② 試験体の製作

モルタルおよびコンクリートの試験体の製作に使用した材料および配合を表-2に示す。型枠にモルタルまたはコンクリートを打ち込んだ後、温度20℃、相対湿度60%の環境で5日間封緘養生

表-1 被膜剤の種類

記号	被膜剤の種類
N	被膜剤無塗布
CB	市販のハイブリッド被膜養生剤
SS	市販のシラン系吸水防止剤
CB+B	開発中のハイブリッド被膜剤
CB+G	開発中のハイブリッド被膜剤
CB+T	開発中のハイブリッド被膜剤
PF	市販のパラフィン系養生剤

生した後、型枠をはずして試験体の表面に各被膜剤を 150 g/m<sup>2</sup>として塗布した。

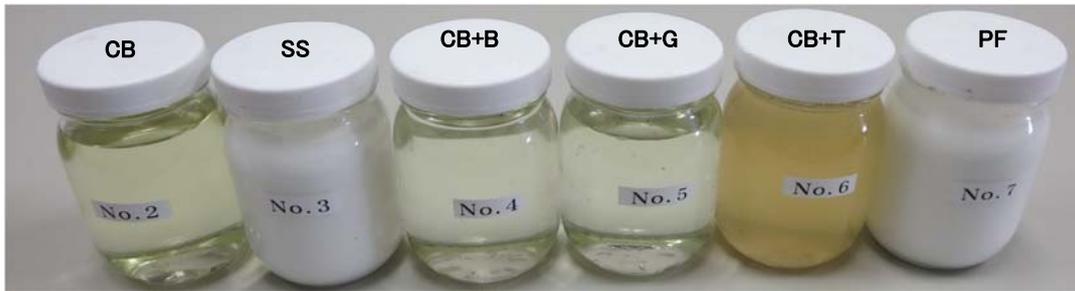


写真-1 各種被膜剤の外観

表-2 モルタルおよびコンクリートの配合

試験体種類	セメントの種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/cm <sup>3</sup> )			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
耐候性促進試験用	普通ポルトランドセメント	50	—	450	900	2700	—
吸水率試験用		50	44	165	330	805	1037
中性化促進試験用		50	44	165	330	805	1036 (ASR骨材)
ASR促進試験用	ASR試験用普通ポルトランドセメント	50	44	165	330	805	1036 (ASR骨材)

### ③ 室内促進劣化試験の方法

被膜剤の耐候性促進試験は「塗膜の長期耐久性 (キセノンランプ法)」JIS5600-7-7 に準拠し、自然環境 10 年分の紫外線暴露に相当するキセノンランプで照射した (放射速度: 180W/m<sup>2</sup>のスーパーキセノン、暴露方法: 方法 1 (紫外域および可視域で水平面全天放射の分光分布に一致させる)、温度 38±3°C、連速運転、相対湿度 40~60%、暴露時間: 4600 時間)。キセノンランプ促進試験の様子を写真-2 に示す。

熱冷繰返し抵抗性試験は、図-1 に示すように、最低温度 15°C、最高温度 80°C、6 時間 1 サイクルで、200 サイクルを行った。

コンクリートの中性化促進試験は、「コンクリートの促進中性化試験方法」JIS A 1153 に準拠し、CO<sub>2</sub> 濃度 5%、温度 20°C、相対湿度 60%の環境で 26 週間行った。

ASR 促進試験は、写真-3 に示すように、温度 40°C の NaCl 飽和溶液に試験体を浸漬し、試験体の長さの変化量を測定し、膨張率を算出し、コンクリートの ASR に対する各被膜剤の抑制効果を評価した。

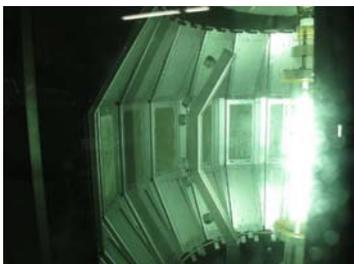


写真-2 耐候性促進試験中の照射

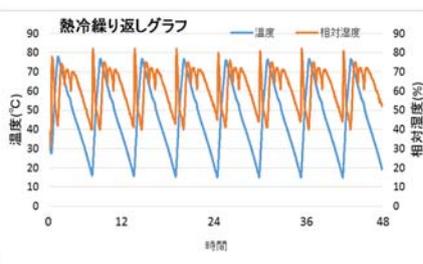


図-1 熱冷繰返し試験の記録



写真-3 ASR 促進試験体

### (2) 厳しい自然環境の暴露試験による CB 養生剤の耐久性向上効果の経時変化の調査

室内促進試験の結果から選定した CB 養生剤を塗布したコンクリート試験体を厳しい自然環境すなわち、都市部のコンクリート中性化環境と海岸部の塩分浸透環境で暴露し、定期的にコンクリート試験体の耐久性に関する指標、例えば、コンクリートの吸水率、塩分浸透深さ、中性化深さ、ASR による膨張率を測定し、CB 養生剤の耐久性向上効果の経時変化を調べる。

都市部の暴露試験は、写真-4 に示すように愛知県豊田市内で試験体を暴露し、図-2 および図-3 に示す日照時間と気温で 4 年間暴露した。

海岸部の暴露試験は、写真-5 に示すように、愛知県半田市の海岸で試験体を暴露し、図-4 および図-5 に示す日照時間と気温で 1 年間暴露した。

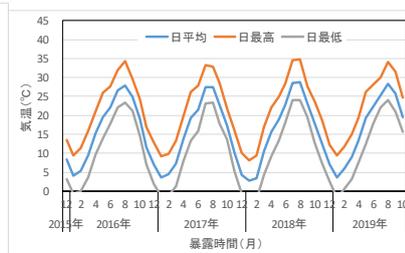
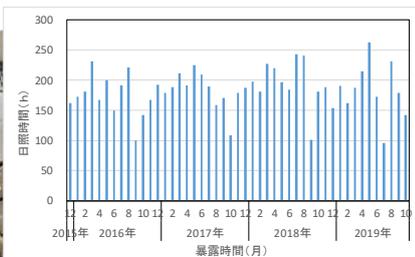


写真-4 都市部暴露試験

図-2 暴露期間中の日照時間

図-3 暴露期間中の気温

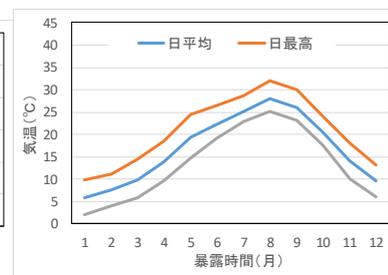
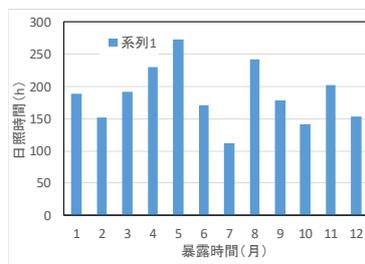


写真-5 海岸部暴露試験

図-4 暴露期間中の日照時間

図-5 暴露期間中の気温

### (3) C B養生剤の耐久性向上効果の持続限界と予測方法の確立

室内促進劣化試験と厳しい自然環境の暴露試験の結果から、C B養生剤の耐久性向上効果において、室内促進劣化試験の劣化速度と自然環境の暴露試験の劣化速度の関係を調べ、C B養生剤の耐久性向上効果の持続限界およびその予測方法を確立する。コンクリート構造物の耐久性設計と維持管理に必要な基礎データを収集する。

## 4. 研究成果

### (1) 吸水抑制効果の持続性

耐候性促進試験、熱冷繰返し試験、および都市部暴露試験における吸水率の変化をそれぞれ図-6、図-7、および図-8に示す。図-6より、自然界の約10年間分の紫外線に相当する4600時間のキセノンランプの照射後、新型ハイブリッド被膜養生剤CB+Bを用いた試験体の吸水率が高くなったものの、無塗布または他の被膜剤を塗布した試験体に比べ、吸水率が低く、高い耐久性向上効果が維持していることが確認された。

一方、熱冷繰返しを受けた試験体の吸水率の変化においては、図-7に示すように、新型ハイブリッド被膜養生剤CB+Bを塗布した試験体は、熱冷繰返しを受けても低い吸水率が維持され、すなわち、高い耐久性向上効果が維持している。

また、都市部の室外で暴露されていた試験体の吸水率の変化においても、図-8に示すように、新型ハイブリッド被膜養生剤CB+Bを塗布した試験体は、吸水防止剤SSを塗布した試験体より吸水率が高いが、4年間の暴露後の吸水率が低く、耐久性向上効果が維持されていることが明らかになった。

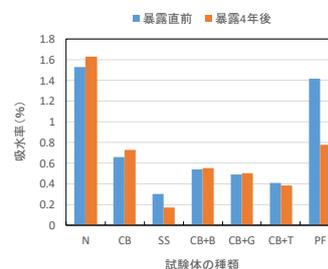
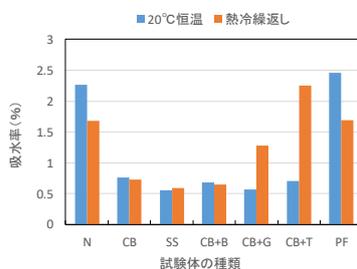
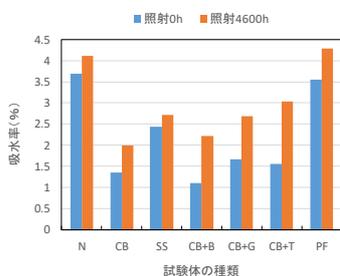


図-6 耐候性試験の結果

図-7 熱冷繰返し試験の結果

図-8 都市暴露試験の結果

### (2) A S R抑制効果の持続性

A S R促進試験の測定結果を図-9に示す。温度20°C、相対湿度60%の室内で保管した試験体においては、新型ハイブリッド被膜養生剤CB+B、CB+G、CB+Tを塗布した試験体は、無塗布の試験体Nに比べ、膨張率が低かったため、新型ハイブリッド被膜剤のA S R抑制効果が確認された。また、熱冷繰返しを受けた試験体においても、気中保管でA S R抑制効果が最も優れたCB

を塗布した試験体の膨張率が大きくなって、ASR抑制効果の大幅に低下したことと対照的に、新型ハイブリッド被膜養生剤 CB+T、CB+G、CB+B をそれぞれ塗布した試験体の膨張率は気中保管の場合とほぼ同程度であり、新型ハイブリッド被膜養生剤の ASR 抑制効果が維持されたことが確認された。

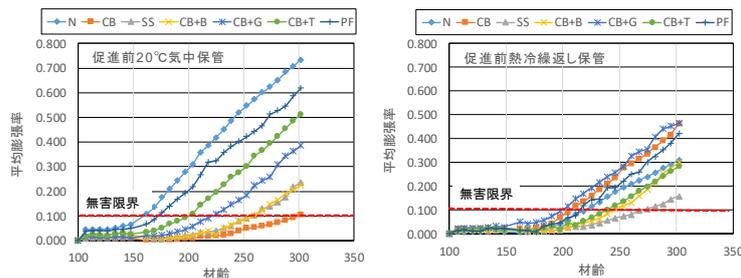


図-9 ASR促進試験の結果

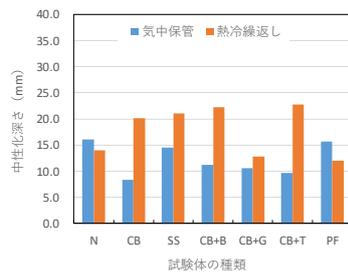


図-10 中性化促進試験の結果

### (3) 中性化抑制効果の持続性

各種試験体の中性化促進試験での中性化深さを図-10 に示す。気中保管した試験体において、新型ハイブリッド被膜養生剤を塗布した試験体の中性化深さは無塗布または他の被膜剤を塗布した試験体に比べ、中性化深さが小さく、高い抑制効果が見られた。しかし、熱冷繰返しを受けた場合、CB+G を塗布した試験体を除き、他の2種類の新型ハイブリッド被膜養生剤を塗布した試験体の中性化深さが大きくなった。その原因は、無塗布試験体に比べ、新型ハイブリッド被膜養生剤を塗布した試験体は、被膜剤の撥水作用で試験体内部へ水分凝集による水分浸透が少なく相対湿度が中性化の進行しやすい50%程度に保たれたことと推測される。

### (4) 塩分浸透抑制効果の持続性

4年間で10%NaCl 溶液に浸漬した各種試験体の表面から5mm、15mm、25mm、35mmの深さでの塩化物イオン含有量を図-11 に示す。この図によると、試験体の表面から35mm深さの箇所まで各種試験体の塩化物イオン含有量は、SS を塗布した試験体を除き、新型ハイブリッド被膜 CB+B、CB+G、および CB+T を塗布した試験体が少なかった。この結果から新型ハイブリッド被膜は高い塩分浸透抑制効果があることが確認できた。

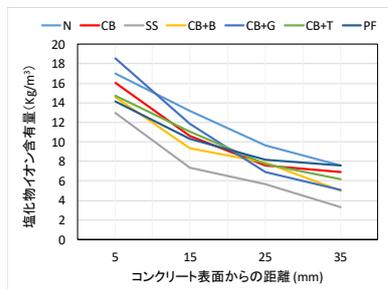


図-11 塩分浸漬試験の結果

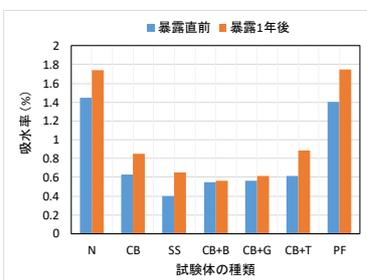


図-12 海岸部暴露前後の吸水率

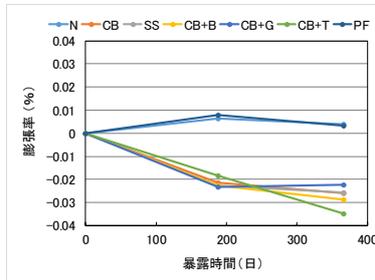


図-13 海岸部暴露前後のASR

### (5) 海岸部暴露中の耐久性向上効果の持続性

海岸部で暴露されている試験体の吸水率試験の結果を図-12 に示す。この図から、新型ハイブリッド被膜養生剤 CB+B を塗布した試験体は、暴露直前の吸水率と暴露1年後の吸水率が低く、被膜剤の劣化による試験体の吸水率の上昇が見られなく、高い耐久性向上効果が維持していることが確認できた。

また、同じ海岸部で暴露されている SAR 試験体の膨張率の測定結果を図-13 に示す。この図より、被膜剤を塗布しない試験体 N と市販の養生剤を塗布した試験体 PF においては、ASR による試験体の膨張が見られたが、これに対して新型ハイブリッド被膜養生剤を塗布した試験体 CB+B、CB+G、CB+T においては、被膜剤の撥水作用によって ASR に必要な水の供給が抑制されて、ASR による試験体の膨張はなく、コンクリートの自己収縮による収縮していることが確認された。

### <引用文献>

- ① 金桶湧平、馬淵みちる、呉承寧、熱冷繰返し促進によるハイブリッド被膜養生剤の長期耐久性向上効果への影響、平成30年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集、2019、485-486
- ② 佐藤秀哉、片岡賢、呉承寧、耐候性促進試験と自然暴露によるハイブリッド被膜養生剤の長期耐久性向上効果への影響、平成30年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集、2019、489-490

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤秀哉、片岡賢、呉承寧
2. 発表標題 耐候性促進試験と自然暴露によるハイブリッド被膜養生剤の長期耐久性向上効果への影響
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金桶湧平、馬淵みちる、呉承寧
2. 発表標題 熱冷繰り返し促進によるハイブリッド被膜養生剤の長期耐久性向上効果への影響
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岩月 栄治  (Iwatsuki Eiji)  (10278228)	愛知工業大学・工学部・教授    (33903)	