

# 鉄筋コンクリート構造物の剝離・剝落に関する 点検および補修

鳥取 誠一

近年、鉄筋コンクリート構造物の剝離・剝落対策に関する技術開発が精力的に進められている。本報文では剝離箇所の点検法として、アクティブ赤外線法の適用性について検討した。種々の試験の結果、アクティブ赤外線法に用いる照射光源は照射面との距離に応じて、遠赤外線光源あるいはキセノンアーク光源を用いるのがよいことがわかった。また、剝離・剝落箇所の補修法として新しい吹付け断面修復法を開発したので、その概要についても紹介する。

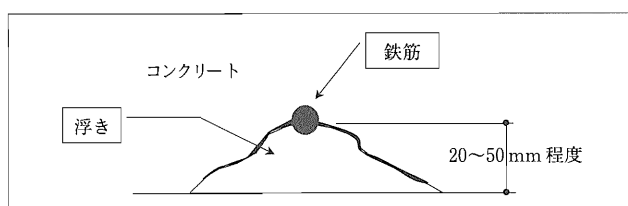
キーワード：鉄筋コンクリート構造物、剝離・剝落、アクティブ赤外線法、断面修復、吹付け

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の維持管理に関する重要性が認識され、多くの技術開発が行われるようになってきた。とりわけ、コンクリートの剝離・剝落対策は、実務上、喫緊の課題であり、点検方法、補修法に関して多くの検討が進められている。

コンクリートの剝離・剝落対策は、山岳トンネルの覆工コンクリートのような無筋コンクリートの場合と、鉄筋コンクリート構造物の場合とでは相当に異なる。無筋コンクリートの場合には、比較的深部に変状があっても、変状に起因するコンクリートのひび割れが表面付近に達すると、コンクリートの剝離・剝落が生じ得る。

したがって、無筋コンクリートの場合には、深部の変状とコンクリート表面のひび割れを的確に検出することが求められる。これに対して、鉄筋コンクリート構造物においては表面付近に鉄筋が配置されているため、深部の変状が直接的に剝離・剝落の原因となることは考え難い。しかし、図—1に示すような鉄筋腐食に起因して生ずる剝離・剝落は生じやすいため、表面付近のコンクリートの変状を的確に検出する方法と、



図—1 鉄筋腐食によるコンクリートの剝離・剝落

剝離・剝落箇所の合理的な補修方法を確立することが必要である。

本報文では鉄筋コンクリート構造物を対象に、剝離・剝落に関する点検法とその補修法について検討した結果を報告する。

## 2. コンクリートの剝離の点検方法

コンクリートの剝離の点検方法として、表—1のような方法が挙げられる。

表—1 コンクリートの剝離の点検方法

点検方法	特 徴	
目 視 法	剝離箇所の見落としの可能性が残る。	
打 音 法	確実であるが、効率性、客観性に課題が残されている。	
赤 外 線 法	パッシブ法 (非加熱)	加熱装置を要しないが、気象条件によっては所要の測定精度を確保できない場合がある。
	アクティブ法 (加熱)	気象条件の影響を受け難い。

目視法は主に地表面から、構造物を点検する方法で、これまで一般的に行われてきた方法である。最も簡易で、効率性にも優れるため、今後も目視法の重要性は変わらないと思われる。しかし、目視法では橋梁の桁のように高い位置にある部位の点検を確実に行うことは困難である。コンクリートの剝離・剝落が問題となる構造物においては、目視法を補完する点検法を検討する必要があると言える。

打音法はハンマー等でコンクリート表面を叩いた際の音により、剝離の有無を確認する方法である。目視法に較べれば確実な方法であるが、点検員が構造物に

近接する必要があるが、点検の効率性に課題が残されている。また、点検員の聴覚により評価がなされるため、結果に個人差が生じる面もある。

目視法における精度、打音法における効率に関する課題を解決する手法として、近年、赤外線法の適用が注目されている。

図-2に示すように、気象条件等により、コンクリート表面が加熱されると、剝離箇所のような欠陥部では表面温度が周囲に比べて高くなるが、赤外線法ではこのコンクリート表面の温度分布を赤外線カメラで測定することにより、剝離箇所を検出する。

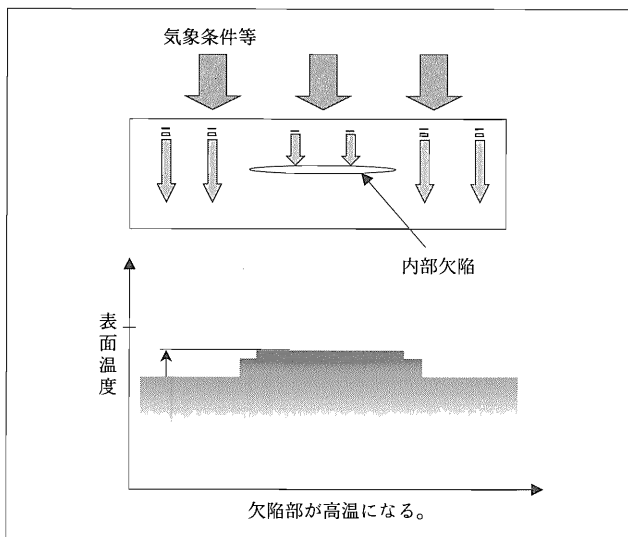


図-2 コンクリート表面が加熱された場合の温度分布

赤外線法は表-1のように、パッシブ赤外線法とアクティブ赤外線法に区分される。

パッシブ赤外線法は気象条件等により生じた温度分布を測定する方法で、比較的容易に測定が可能である。しかし、気象条件や構造物の向き等の影響により、コンクリート表面に十分な温度差が生じていない場合には、測定不能となる場合があり、やや再現性に乏しい方法と言える。

これに対して、アクティブ赤外線法では図-3のように、コンクリート表面を人工的に加熱してから、温

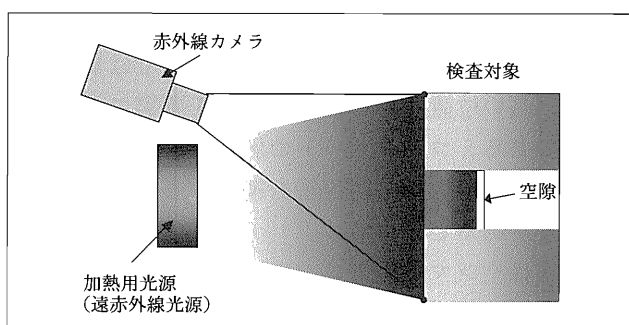


図-3 アクティブ赤外線法の概要

度分布を測定する。加熱設備が必要ではあるが、確実な測定が可能である。

これまでパッシブ赤外線法に関しては比較的多くの研究事例があり、測定可能な気象条件等が明らかにされている<sup>1)</sup>。これに対して、アクティブ赤外線法に関する研究は少なく、実用化のためにはさらに研究が必要と考えられる

### 3. アクティブ赤外線法の適用 (照射面が近い場合)<sup>2)</sup>

#### (1) 概要

実構造物にアクティブ赤外線法を適用した事例として、帝都高速度交通営団（現、東京地下鉄株式会社）が1998年に世界で初めて実用化したトンネル検査車が知られている。

この検査車には、コンクリート覆工を加熱するヒーター、赤外線カメラ、可視画像を撮影するCCDカメラ等が搭載されている。ヒーターとしてハロゲンランプが用いられており、これにより加熱されたコンクリート中の剝離等の変状が赤外線カメラにより検出される。また、CCDカメラによって、コンクリートのひび割れが検出される構成になっている。

このトンネル検査車においては、幅1mm以上のひび割れ、深さ5mm以下の剝離の検出が可能である。地下鉄のトンネル覆工は鉄筋コンクリート構造であるため、ひび割れについては幅1mm以上のものが検出されれば構造物に対する影響は少ないと考えられる。また、剝落の危険性がある部位は必ず表面に変化が生じることから、剝離の検出深さには上記の値が設定されている。しかし、構造物を予防保全的に維持管理するためには、より深い位置の剝離も検出されることが望ましいと考えられることから、以下の検討を行った。

#### (2) 加熱方法の検討

トンネル覆工のように加熱光源から照射面の距離が近い場合には、遠赤外線光源またはハロゲンランプの適用が可能と考えられる。

そこで、図-4に示すような階段状に厚さが異なるコンクリート供試体（奥行き150mm）に遠赤外線光源またはハロゲンランプを照射して、照射前後のコンクリート表面の温度差を測定した。この場合の照射条件は、両ランプとも照射密度を $5.5 \text{ kW/m}^2$ 、照射時間を5sまたは10sとした。この結果より、同一の照射エネルギーであっても、遠赤外線光源による方が照

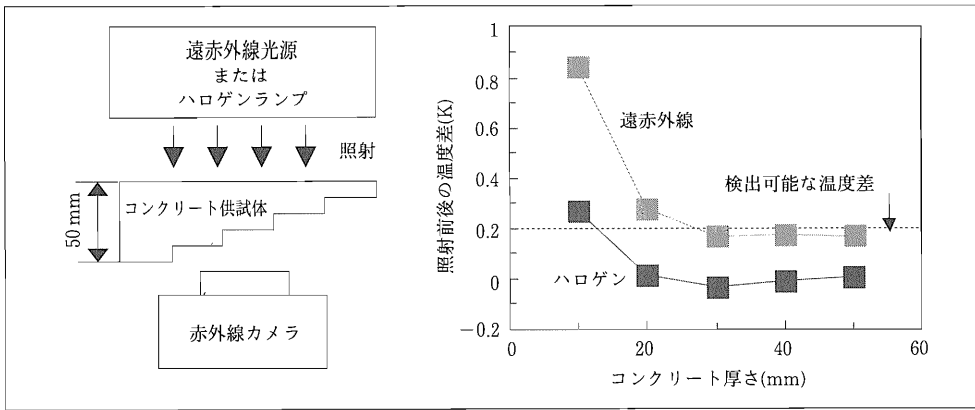


図-4 遠赤外線とハロゲンランプの比較

射前後の温度差が大きく、ハロゲンランプよりも優位であることが把握された。

きることが確認された。さらに、走行試験を重ねた結果、時速4 km/h程度で走行しても実用上満足すべき画像が取得できることを確認した。

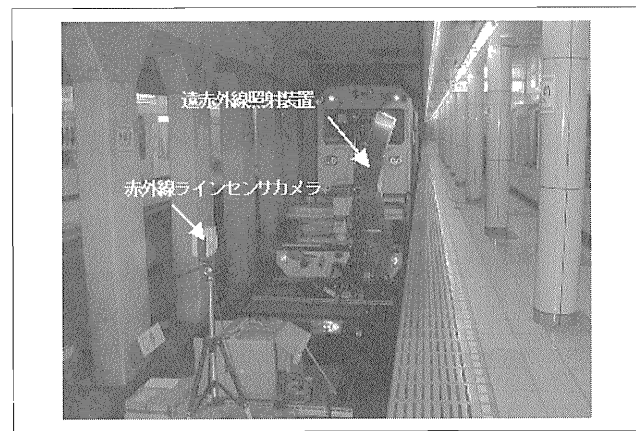
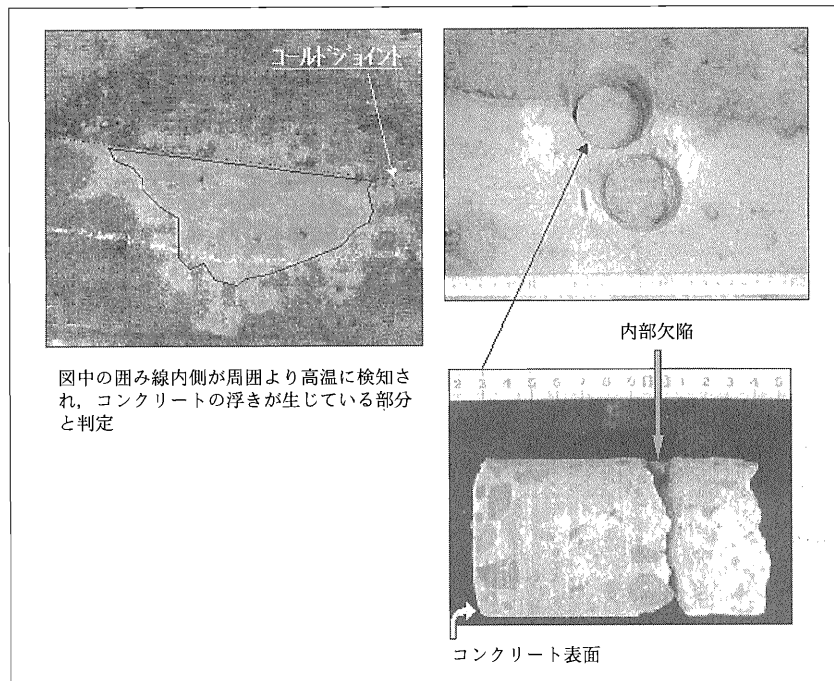


図-5 遠現地試験の状況



図中の囲み線内側が周囲より高温に検知され、コンクリートの浮きが生じている部分と判定

図-6 コールドジョイント近傍の調査結果

### (3) 現地試験

上記の結果を踏まえ、図-5の遠赤外線照射装置を試作し、現地試験を行った。トンネル覆工のコールドジョイント近傍における赤外線画像と可視画像を重ね合わせた画像と、コンクリートコアを図-6に示す。これより、深さ70mm程度の位置のひび割れの把握で

## 4. アクティブ赤外線法の適用 (照射面が遠い場合)<sup>3)</sup>

### (1) 概要

3章の結果から、トンネル覆工のように加熱光源から照射面までの距離が短い場合には、遠赤外線光源の適していることが把握されたが、遠赤外線は集光することができないため、高架橋のように点検する部位が地表から離れている場合には、遠赤外線光源を適用することが困難である。そこで、照射面が遠い場合におけるアクティブ赤外線法の適用法について検討した。

### (2) 加熱方法の検討

剥離部と健全部の温度差を大きくするには、照射光源の光のエネルギー密度が大きいほど有利であるが、高架橋点検を想定した場合、これに加えて、ある程度照射距離が長くても照射面において所要の光エネルギー密度の確保が必要条件となる。

そこで、このような条件を満足する光源として図-7に示すように反射鏡を取付けたキセノンアーク光源の適用を検討した。キセノンの波長領域はハロゲンとほぼ同様であるが、通常のタングステン・フィラメントを有する光源やメタルハライド・ランプのようにガス状の金属ハロゲン化合物が発光する光源と異なり、発光部がスポットに近い点光源となっているため、集光性に

優れ、遠隔距離でも必要な照射エネルギー密度を確保することが可能である。

遠隔照射における有効性を検証するため、キセノン光のエネルギー密度を計測した結果、10 m 離れた位置において、照射エネルギー密度が  $15 \text{ kW/m}^2$  で直径約 28 cm の光を得ることができた。

コンクリート中に発砲スチロールを埋込んだ供試体に、キセノンアーク光源を照射して得た赤外線画像を図-8 に示す。この結果から、深さ 30 mm 程度の空隙が確認されることがわかった。剝離の検出深さは遠赤外線光源に較べればやや小さいものの、鉄筋腐食によるコンクリートの剝離は、かぶり厚が 30 mm 程度以下の場合に多いため、キセノンアーク光源の適用は可能であると判断された。

(3) 現地試験

図-9 に示すように、高架橋の現地試験を行った。中央の写真のようにコンクリート面を約 400 秒間照射し、照射直後から 10 秒間隔で 1 分間、赤外線画像を撮影した。

キセノンアーク光源照射前のパッシブ赤外線画像では、補修跡や剝離は明瞭に観測されなかったが、照射後のアクティブ赤外線画像では、数箇所の補修跡および剝離が明瞭に観測された。また、

パッシブ画像では観測できなかった剝離も一部検出できることがわかった。以上の結果より、キセノンアーク光源を用いたアクティブ赤外線法の実用性が確認された。

5. 吹付けによる断面修復法の開発<sup>4)</sup>

(1) 概要

コンクリート構造物中の鉄筋腐食等により、コンクリートに剝離・剝落が生じた場合、当該箇所をはつり落とし、断面修復を施すのが一般的である。修復規模が小さい場合には左官工、修復規模が大きい場合には吹付け工が適用される場合が多い。

左官工による断面修復は実績も多く、修復法はほぼ確立されている。近年の構造物の経年に伴う変状の増加に伴い、吹付け工による断面修復の適用事例は増加傾向にある。

吹付け工による断面修復は 20 年程前から適用されるようになってきている。初期の頃は乾式工法が適用されたが、施工時の粉塵等が多く発生するため、1990 年頃から湿式工法の適用例が増加している。

また、近年においては、吹付けモルタルと既設コン

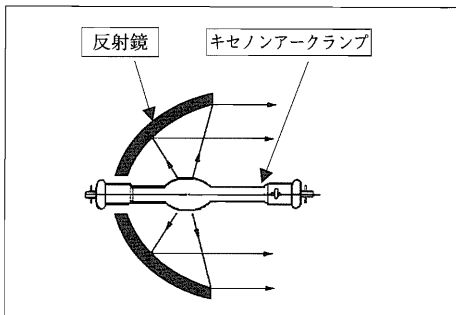


図-7 キセノンアーク光源

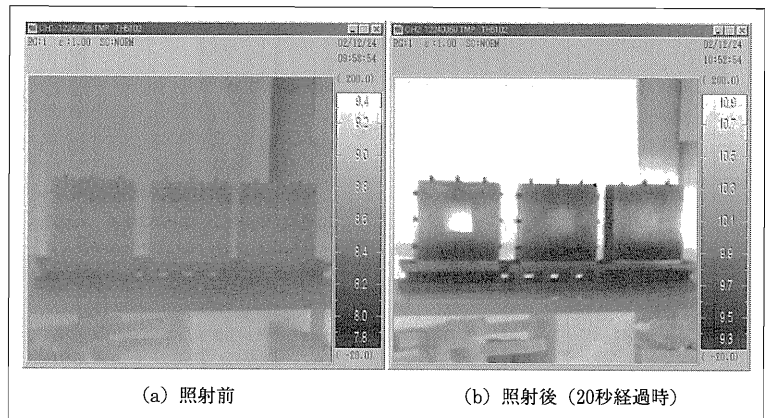


図-8 赤外線画像 (模擬空隙供試体: 左から空隙深さ 10, 20, 30 mm)



図-9 現地試験の状況

クリートとの付着強度を確保するため、吹付けモルタルをポリマーセメントモルタルとする場合が多く、ミキサにはポリマーも加えて練混ぜを行うのが一般的である。

以上のように、湿式工法による吹付け工も10年以上の実績を有し、一定レベルの品質は確保されるようになってきているが、既存の吹付け断面修復法を調査した結果、吹付け可能厚さ、モルタルの流動性、ひび割れ抵抗性、鉄筋背面への吹付け法等に課題が残されていることが把握された。そこで、これらの課題に留意して新たに吹付け断面修復法を開発することとした。以下に開発した吹付け断面修復法の概要、特徴等について述べる。

(2) 吹付け可能厚さに関する検討

既存の湿式吹付けによる断面修復法においては、吹付けたモルタルが硬化するまでに落下しないようにするため、吹付け可能な厚さが20~50mm程度に制限される。このため、修復厚さが大きい場合には、図10に示すように多層に吹付けを行う必要が生じるが、多層の吹付けを行うことは、付着強度の確保、施工効率の面で好ましくない。

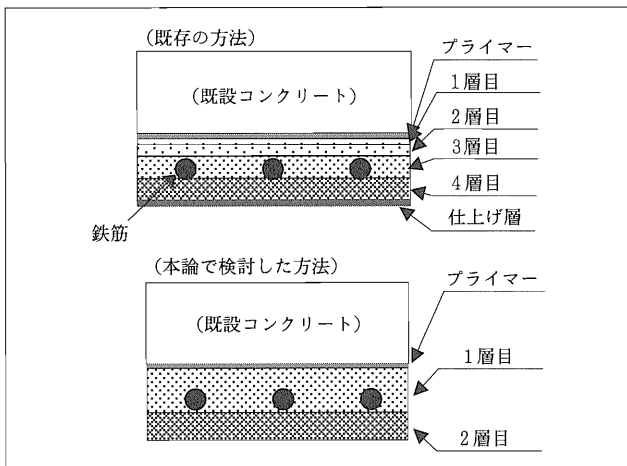


図10 吹付け厚の検討

そこで、開発に際しては急結剤をノズル先端で添加することにより、吹付けが可能な厚さを増大させ、図10のように断面修復を2層で行うことを検討した。断面修復を2層とするのは、ある程度の厚さまでこてで圧力を作用させた方が吹付けモルタルが緻密になること、表面付近のモルタルには乾燥収縮等によるひび割れ防止用の繊維を混入させる場合があること、等による。

吹付け可能な厚さを把握するため、表2、表3に示す材料、配合を用いて吹付け試験を行った。なお、

表2 試験に用いた材料

種類	材料
結合材	B 早強セメント、収縮抑制混和材
砂	S 粒径 1.2 mm 以下
ポリマー	P1 酢酸ビニル、エチレン共重合樹脂 P2 ポリアクリル酸エステル樹脂 P3 アクリル酸エステル等の共重合樹脂 P4 酢酸ビニル、アクリル等の共重合樹脂
減水剤	SF ポリカルボン酸系
繊維	F ビニロン繊維、繊維長 25 mm
急結剤	AF アルカリフリー液体急結剤

表3 試験に用いた配合

配合条件		
水結合材比	W/B (%)	38
砂結合材比	S/B (%)	1.9
ポリマー結合材比	P/B (%)	5.0
繊維混入率	V <sub>f</sub> (vol%)	0~0.6
急結剤添加率	AF (B×%)	7.0

断面修復においては美観を保持する観点から、こて仕上げを行う場合があるため、急結剤には急結性が比較的穏やかな水溶性アルミニウム塩を主成分とするアルカリフリー液体急結剤を用いることとした。また、ポリマーには表2中のP4の材料を用いた。

吹付け試験の結果、吹付けが可能な厚さは200mm程度以上であることが確認され、断面修復を2層で行うことは十分に可能であると判断された。

(3) 流動性に関する検討

湿式工法ではミキサで練混ぜたモルタルを圧送するため、モルタルは材料分離を生じない範囲で、高い流動性を保持させる必要がある。

一般にモルタルの流動性を表す指標として JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に規定されるフロー値が用いられる。既存の断面修復材に用いられるモルタルのフロー値は一般に170mm程度であるが、特に夏季においてはモルタルの流動性が著しく低下し、ホース内における閉塞の原因となる場合がある。

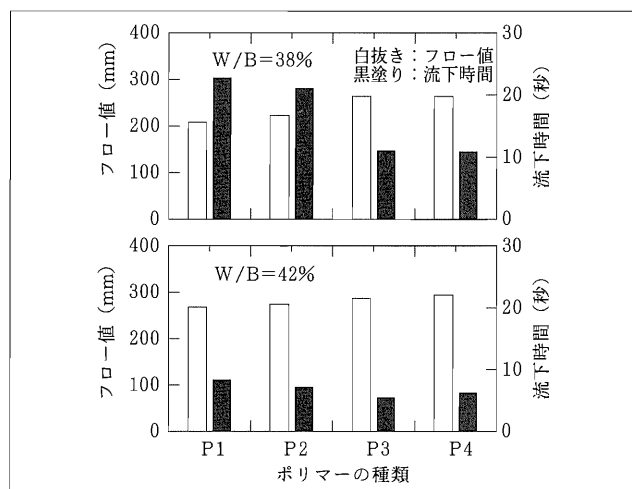
そこで、開発に際しては減水剤を利用して、モルタルの流動性をできるだけ高めるようにした。ただし、極端に流動性を高めると、モルタルが材料分離するため、流動性と同時に適度な粘性を付与し、材料分離が生じないように配慮した。

吹付けモルタルに用いるポリマーにより流動性、粘性等は大幅に変化すると考えられるので、種々のポリマーを用いてその性状を調べた。用いた材料は表2のとおりで、P1~P4の4種類のポリマーについて検討した。なお、ポリマーには液体のポリマーディス

パーサント (dispersant) と粉体の再乳化形粉末樹脂があるが、ここでは配合の単純化を図る観点から、4種類とも再乳化形粉末樹脂とした。配合条件は表—3に示すほか、水結合材比を42%とした場合についても検討した。

図—11にポリマーの種類を変化させた場合のフロー値と、粘性を評価するために川端ら<sup>5)</sup>が提案した傾斜流量計の流下時間を示す。フロー値はいずれのポリマーを用いた場合も200~300mm程度の値が得られ、既存の断面修復材に用いられるモルタルのフロー値よりも大きな値が得られた。ポンプ圧送に適する粘性は川端らによれば、12秒以下とされている。したがって、粘性の観点からはP3またはP4のポリマーを用いるのがよいと判断される。しかし、P3のポリマーを用いた場合には、空気を多量に連行し、消泡剤等の併用が必要となった。以上の結果を総合的に判定して、P4のポリマーを用いることとした。

以上の検討により、従来のポリマーセメントモルタルよりも流動性が高く、材料分離を生じにくいポリマーセメントモルタルを製造することが可能になった。表—3に繊維混入量を変化させた場合のフロー値、流下時間および空気量を示す。これから、繊維混入量はこれらの値に大きな影響を及ぼさないこと、吹付け後の空気量は吹付け前の40%程度となるため、粘性が増加し、流下時間が長くなること、等が把握された。



図—11 流動性、粘性に関する試験結果

#### (4) ま と め

誌面の都合により、内容の紹介は割愛するが、上記ポリマーセメントモルタルの強度等の硬化物性に関しても、所要の値が得られることを確認している。今後、実施工に適用しながら必要な改良を施していく予定である。

## 6. おわりに

コンクリート構造物の剝離・剝落対策に関する研究の結果を紹介させて頂いた。本報文に示した内容には改良すべき点が多く残されている。読者諸賢のご指摘等頂ければ幸いである。

なお、本報の3章の内容は筆者の所属する財団法人鉄道総合技術研究所と、帝都高速度交通営団(当時)、三菱重工業株式会社との共同研究によるものである。また、5章の内容は財団法人鉄道総合技術研究所、株式会社大林組、東急建設株式会社、昭栄薬品株式会社、日本化成株式会社との共同研究により実施したものである。関係の方々のご指導、御協力に感謝申し上げる次第である。

JCM/A

#### 【参考文献】

- 1) 長田文博, 山田裕一, 虫明成生, 赤松幸生: 熱画像による鉄道高架橋コンクリートの剝離診断手法の開発, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.121-133, 2004.5
- 2) 鳥取誠一, 宮田信裕, 長田文博, 栗田耕一: 赤外線サーモグラフィ法による鉄道コンクリート構造物の非破壊検査, 非破壊検査, Vol.51, No.3, pp.134-138, 2002.3
- 3) 鎌田卓司, 鳥取誠一, 中村圭二郎, 栗田耕一: 遠隔加熱によるアクティブ赤外線法を用いたコンクリート高架橋の検査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, 2003.7
- 4) 伊藤正憲, 鳥取誠一, 久保征則, 長野央照: 繊維混入湿式吹付けモルタルの開発, 土木学会第57回年次学術講演会概要集, 2002.9
- 5) 川端僚二, 江口公道, 南田尚胤, 山下 信: セグメントのボルトボックス吹付け充填工法の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1375-1380, 1999.7

#### 【筆者紹介】

鳥取 誠一 (とっとり せいいち)  
財団法人鉄道総合技術研究所  
コンクリート構造研究室  
室長

