

首都高速道路 1 号上野線本線上における床版補修工事 — RC 床版上面補修工法「PCM 舗装」の開発 —

持田 泰子*1・山本 誠*2・石原 陽介*3・青木 聡*4

高速道路における RC 床版は、供用開始から約 50 年が経過し、この間にアスファルト舗装の打換えが実施されている。舗装打換え工事では、アスファルト下層にある RC 床版上面が、切削機により削られる場合がある。切削された RC 床版は、鉄筋の露出による鉄筋腐食、床版厚の減少による疲労耐久性の低下などが懸念され、設計床版厚となるように適切な補修材料で床版厚を復旧する必要がある。床版上面補修工法としては、従来から使用されている移動プラント車による施工が考えられたが、需要拡大により台数の確保が困難となっている。また、補修材料の面では、既存 RC 床版のたわみへの追従性と接着性の確保が求められた。

本稿では、コンクリート構造物の補修工法である乾式吹付け工法を RC 床版補修に応用した「ビニロン繊維入り低弾性超硬ポリマーセメントモルタル舗装（以下、PCM 舗装と称す）」の開発経緯および性能評価に加え、実構造物への適用事例を報告する。

キーワード：RC 床版，乾式吹付け工法，減衰装置，ポリマーセメントモルタル

1. はじめに

アスファルト舗装の打換え時に行う切削によってかぶりコンクリートが削り取られた床版は、鉄筋が全面に露出している箇所の腐食や、床版厚さが薄くなることによる疲労耐久性の低下が懸念される。写真 - 1 には、設計厚さ 170 mm であった RC 床版が約 140 mm 程度まで削られている床版を示す。このような床版は設計厚さまで床版厚を



写真 - 1 度重なる切削により薄くなった床版

復旧する必要がある。その施工方法としては、従来から上面増厚工法で使用されている移動式プラント車の使用が考えられた。しかし、鋼床版の疲労耐久性の向上を目的として鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRC と称す）舗装の採用が増加したため、移動式プラント車の全国的な需要が増加し、必要台数の確保が困難となっている。

そこで、著者らは、コンクリート構造物の補修工法である乾式吹付け工法の材料供給システムに着目し、新たな工法である PCM 舗装を開発した。写真 - 2 には PCM 舗装の施工状況を示す。PCM 舗装は、乾式吹付け工法において材料供給時に生じる圧縮空気と混合材料を、今回新たに開発した減衰装置で分離させ施工する独自の工法である。

従来の移動式プラント車では、混練排出されたモルタルを一輪車を用いて人力で補修箇所まで運搬していた。今回開発した PCM 舗装では、粉体と液体がプラントから施工箇所まで直接運搬され、瞬時に混合排出されるため、これらの労力を必要としないことも特徴の一つである。

材料開発では、一部の SFRC で既存床版からの剥離が報



*1 Yasuko MOCHIDA

住友大阪セメント(株)
セメント・コンクリート
研究所



*2 Makoto YAMAMOTO

住友大阪セメント(株)
セメント・コンクリート
研究所



*3 Yosuke ISHIHARA

首都高速道路(株)
技術部 技術推進課



*4 Satoshi AOKI

(一財)首都高速道路
技術センター

告されている事例があることから、既存 RC 床版へのたわみに追従可能な静弾性係数の低い材料を一つの要求性能とした。これは、SFRC での剥がれの原因として、施工当時、既存 RC 床版と SFRC の層間に接着剤を適用しなかったことによる接着力不足や、SFRC は既存 RC 床版と比較して静弾性係数が高いため、既存 RC 床版のたわみに追従できなかったことが考えられたからである。

さらに、補修工事では、交通規制を伴うため、交通開放時間の短縮も要求される。そこで、超速硬ポリマーセメントモルタルを用いることにより、これらの要求性能を満足するものとした。また、既存 RC 床版からの剥離を防止する対策として、補修対象全面にエポキシ樹脂接着剤を塗布することで接着力を強化した。



写真 - 2 PCM 舗装施工状況

2. PCM 舗装の概要

2.1 乾式吹付け工法の概要

図 - 1 には乾式吹付けシステム図を示す。乾式吹付け工法では、粉体をロータリーガンと呼ばれる粉体供給機に投入し、コンプレッサーから送られる圧縮空気でノズルまで圧送する。液体は高圧ポンプでノズルまで圧送し、ノズル内で粉体と液体を瞬時に練り混ぜ吹き付ける。乾式吹付け工法は、粉体と液体を別べつに圧送することで 200 m 程度の長距離圧送を可能とすることが最大の特長である。

2.2 乾式吹付け工法の道路床版補修への応用

図 - 2 には PCM 舗装施工システム図を示す。乾式吹付け工法では、施工対象に対して時速約 200 km でモルタルを吹き付けるため、道路床版へ直接吹き付けた場合、交通

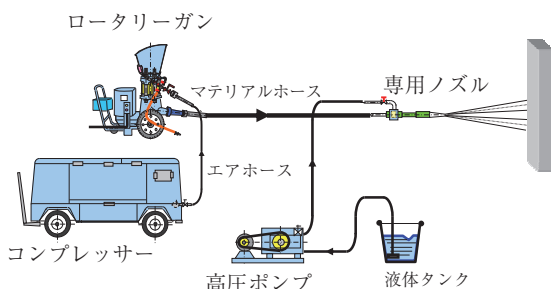


図 - 1 乾式吹付けシステム図

車両への飛散などが懸念される。そこで、乾式吹付け工法を床版補修へ適用するにあたり、専用ノズルへ接続して吹付け速度を低減させる減衰装置を新たに開発した。

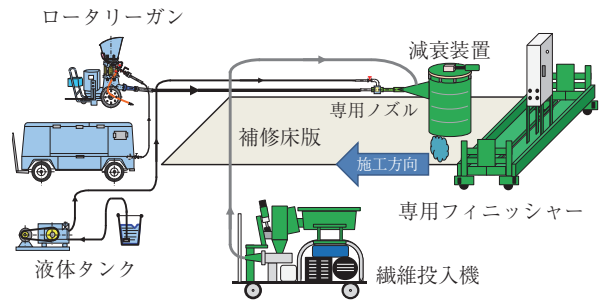


図 - 2 PCM 舗装施工システム図

減衰装置内へ高速・高圧で吹き込まれたモルタルは、内壁に沿って回転することで減速し、自由落下により打設位置へ排出される。この時、モルタルの混合・運搬に寄与した圧縮空気は減衰装置上部にある空気孔から排出される。

さらに、施工後のひび割れ抑制の観点から、減衰装置内でモルタルとビニロン繊維を混合することとし、施工途中でビニロン繊維がホース内で閉塞することを避けるため、減衰装置内へ直接添加可能な繊維投入機も開発した。

減衰装置から練り落とされた繊維入りモルタルは専用のフィニッシャーで仕上げられる。写真 - 3 には専用フィニッシャーを示す。PCM 舗装により施工されるモルタル (以下、PCM モルタルと称す) はポリマーが配合されているため粘性を有しており、従来の角型パイププレートを用いるとモルタルが引きずられた。そこで、今回新たに開発した丸パイプ型スクリードを有する専用フィニッシャーを用いることにより、平坦な仕上げ性を確保した。



写真 - 3 専用フィニッシャー

2.3 PCM モルタルの開発

本工法が適用される施工現場では、材料の要求性能として、早期の交通開放を可能とする超速硬性を有することに加え、既存 RC 床版のたわみに追従する目的で静弾性係数が低い補修材料であることが求められた。また、既存 RC

床版への劣化因子の浸入を抑制するため、一般的なポリマーセメントモルタルと同等の透水抵抗性を有する材料とした。表 - 1 には PCM モルタルの開発に対する目標値を示す。

表 - 1 PCM モルタル開発目標値

圧縮強度 (材齢 3 h) (N/mm ²)	圧縮強度 (材齢 28 d) (N/mm ²)	静弾性係数 (材齢 28 d) (kN/mm ²)	可使用時間 (min)
12 以上	24 以上	28 以下	60

首都高速道路「舗装設計施工要領」¹⁾に基づき、打設完了後 2～3 時間で車両通行に耐えられる強度として 12 N/mm² 以上の圧縮強度を発現することを目標にした。さらに、圧縮強度 40 N/mm² 前後の一般的なコンクリートの静弾性係数が 30 kN/mm² 前後であることから²⁾、一般的なコンクリートよりも低弾性である材料として、材齢 28 日で 28 kN/mm² 以下となるように設定した。表 - 2 には開発した PCM モルタルの配合例を示す。プレミックス粉体は、超速硬セメントに各種混和材を加えた結合材と、安定した圧送性を確保するために最適な粒度分布に設計された乾燥珪砂をプレミックスした。またひび割れ抑制の観点からビニロン繊維を混合することとした。

表 - 2 PCM モルタル配合例

プレミックス 粉体 (kg/m ³)	ビニロン 繊維 (kg/m ³)	ポリマー エマルジョン (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	W/B ^{a)} (%)
1 890	16	90	142	25

土木構造物の補修などに用いられるポリマーセメントモルタルでは、再乳化形粉末樹脂をセメントなどと混合してプレミックス粉体とする場合も多いが、本材料では液体であるポリマーエマルジョンを水に添加する方法とした。混練水をポリマーエマルジョンと水の混合水とした理由は、粉体との混練時間が短いなかでポリマーの利点を最大限に生かすためである。つまり、再乳化形粉末樹脂は水と接触後、再乳化するまでに混合時間を要するため、本工法では不適切であると判断した。

材料のフレッシュ性状は、勾配のある施工面でも流動しない範囲で適切に仕上げられるワーカビリティを確保するため、スランプ 10 cm 前後を標準とした。

PCM モルタルは、超速硬セメントを使用しているため、モルタルの練上り温度により硬化開始時間が変動する。そのため凝結時間の調整は、図 - 3 に示すように各練上り温度に応じて凝結調整剤の添加量を調整することで行う。凝結調整剤の添加量は、外気温、材料温度、床版温度からモルタルの練上り温度を予測し、夏季、冬季にかかわらず可使用時間が 60 分程度となるように調整する。

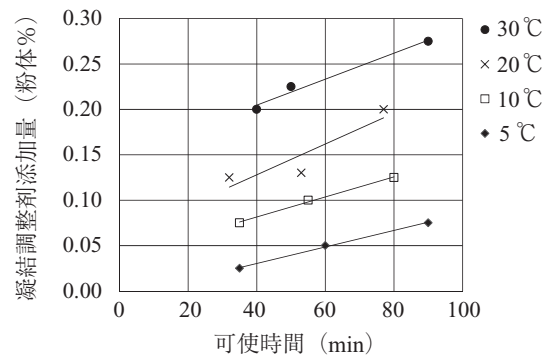


図 - 3 モルタルの練上り温度と凝結調整剤添加量の関係

2.4 PCM モルタルの性能評価

(1) フレッシュ性状

表 - 3 には実機試験での PCM モルタルの可使用時間測定結果の一例を示す。試験の結果、凝結調整剤添加量の調整によって可使用時間を 60 分程度確保できることを確認した。

表 - 3 PCM モルタル可使用時間測定結果一例

練上り温度 (°C)	凝結調整剤量 (粉体%)	可使用時間 (min)
15.7	0.15	60

(2) 圧縮強度および静弾性係数

表 - 4 には PCM モルタルの硬化体物性の一例を示す。圧縮強度、静弾性係数ともに開発目標値を満たしていることを確認した。この結果から、今回開発した PCM モルタルは 2.3 節で示した開発目標値を満足することが確認できた。

表 - 4 PCM モルタルの硬化体物性

圧縮強度 (材齢 3 h) (N/mm ²)	圧縮強度 (材齢 28 d) (N/mm ²)	静弾性係数 (材齢 28 d) (kN/mm ²)
18.3	42.3	23.5

図 - 4 には、開発した PCM モルタルの材齢 28 日に測定した圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中には式 (1) で示される一般的なコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係式から求められる曲線を示した²⁾。

$$E_{1/3} = 1430 \cdot \rho^{1.5} \cdot \sqrt{F_c} \quad (1)$$

ここに、 $E_{1/3}$ ：弾性係数 (N/mm²)

ρ ：コンクリートの気乾単位容積質量 (t/m³)

F_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

なお、コンクリートの気乾単位容積質量は 2.3 t/m³ とした。この結果から、PCM モルタルはコンクリートと比較して、圧縮強度が 30～45 N/mm² の範囲では、同一圧縮強度における静弾性係数が 3 割程度低いことが確認できた。

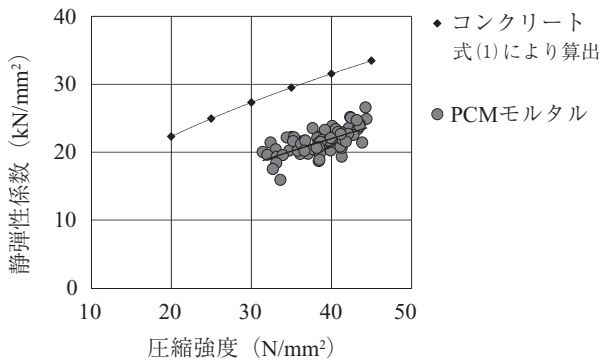


図 - 4 圧縮強度と静弾性係数の関係

(3) 透水抵抗性

PCM モルタルの透水抵抗性は、JIS A 1404「建築用セメント防水剤の試験方法」³⁾に準拠し透水試験により評価した。本試験は、φ 150 × 40 mm の円柱供試体に対して水圧 9.8 kPa を 1 時間保持したあとの供試体の質量を測定することで、供試体への透水量を評価するものである。供試体は、開発した PCM モルタル、市販のポリマーセメントモルタル系断面修復材、普通ポルトランドセメントモルタル ($W/C = 65\%$, $S/C^{b)} = 3$) の 3 種類を用いた。表 - 5 には、透水試験結果を示す。なお、透水量は 3 体の供試体の平均値を示している。PCM モルタルの透水量は、市販ポリマーセメントモルタルとほぼ同等であり、普通ポルトランドセメントモルタルの約 10% まで抑制できる透水抵抗性を有することが確認された。

表 - 5 透水試験結果

使用材料	透水量 (g)
PCM モルタル	0.6
市販ポリマーセメントモルタル	0.2
普通ポルトランドセメントモルタル	8.0

2.5 床版の疲労耐久性評価

PCM モルタルと RC 床版との層間剥離の有無、疲労耐久性を評価するため、輪荷重走行試験を実施した。写真 - 4 には輪荷重走行試験状況を、図 - 5 には今回評価した試験体の概要図を示す。供試体は、昭和 39 年鋼道路橋設計示方書⁴⁾に準じて作製した厚さ 190 mm のコンクリート床版 (以下、S39 床版と称す) の上面を 20 mm 切削した供試体 (上面切削床版)、S39 床版の上面を 20 mm 切削したあと 50 mm の厚さで PCM 舗装を施工した供試体 (PCM 舗装) の 2 種類を用いた。載荷ステップは床版の破壊状況を確認するため、157 kN から開始して、4 万回載荷ごとに 19.6 kN を段階的に載荷し、床版が押抜きせん断破壊に至るまで実施した。

図 - 6 には輪荷重走行試験結果を示す。上面切削床版は 147 000 回 (216 kN) で床版下面の半分が押抜きせん断破壊した状態となり、変位は約 20 mm であった。PCM 舗装は 318 645 回 (294 kN) で床版下面が疲労押抜きせん断破壊した状態となった。試験終了後のたたき点検により走

行範囲に層間剥離が確認されたが、破壊直前のたたき点検では確認できなかったことから、押抜きせん断破壊と同時に剥離したものと思われる。試験終了時の変位は約 14 mm であった。

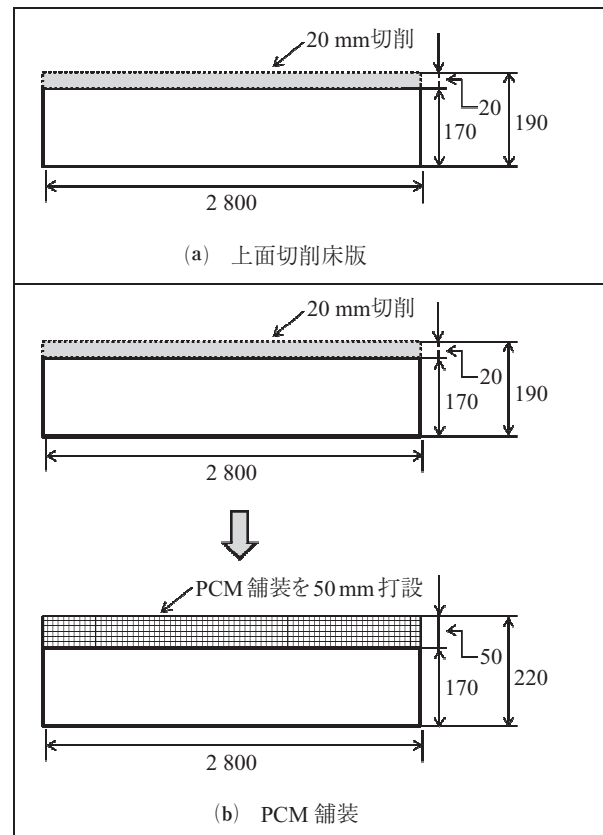


図 - 5 輪荷重走行試験体概要図

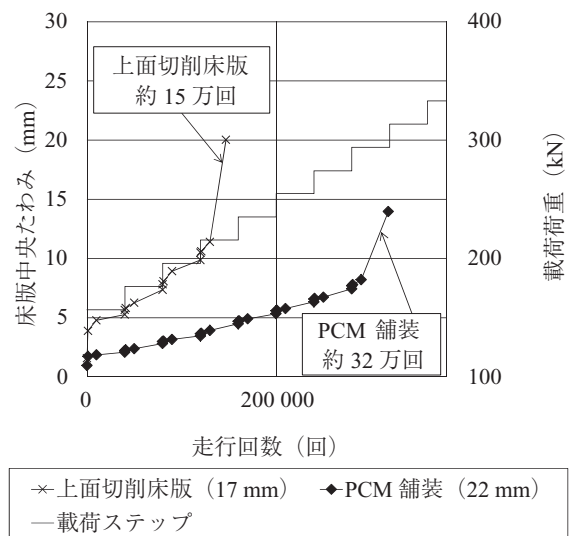


図 - 6 輪荷重走行試験結果

PCM モルタルは、薄くなった床版のかぶりコンクリートを復旧して、既存床版との接着性を確保することにより、劣化因子の浸入を防ぐことを重視し開発を行った。試験の

結果、押抜せん断破壊に至るまで剥離は見られなかったため、高い層間剥離抵抗性を有することが確認できた。

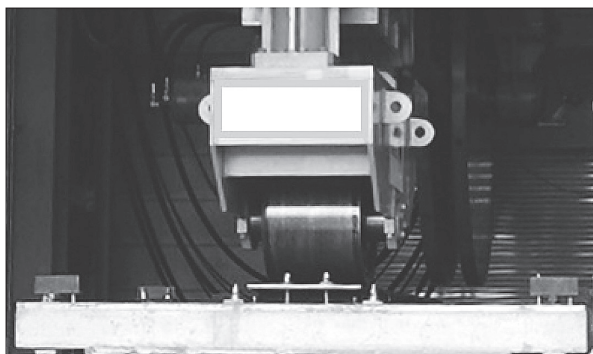


写真 - 4 輪荷重走行試験状況

本試験で得られた疲労破壊回数について、既往の試験結果⁵⁾と比較し疲労耐久性を検証することとした。表 - 6 には、本試験と既往の試験の供試体寸法および配筋状況の一覧を示す。既往の疲労試験では、旧設計基準で製作された道路橋 RC 床版の疲労耐久性を把握することを目的に、昭和 39 年鋼道路橋設計示方書 (RC39)、昭和 47 年道路橋示方書 (RC47)、平成 8 年道路橋示方書 (RC8) に基づいた RC 床版を対象に疲労試験を行っている。図 - 7 には、各床版における載荷荷重と破壊時走行回数の関係を示し、本試験結果を既往の試験結果グラフ上にプロットした。ここでの破壊時走行回数は、試験体の発現強度 (38 N/mm²) を設計基準強度 (27 N/mm²) に補正した疲労破壊回数で示している。試験結果の比較により上面を 20 mm 切削した S39 床版は、50 mm の厚さで PCM 舗装を施工することで、昭和 47 年道路橋示方書の床版 (RC47) と同等まで疲労耐久性が向上することが確認できた。

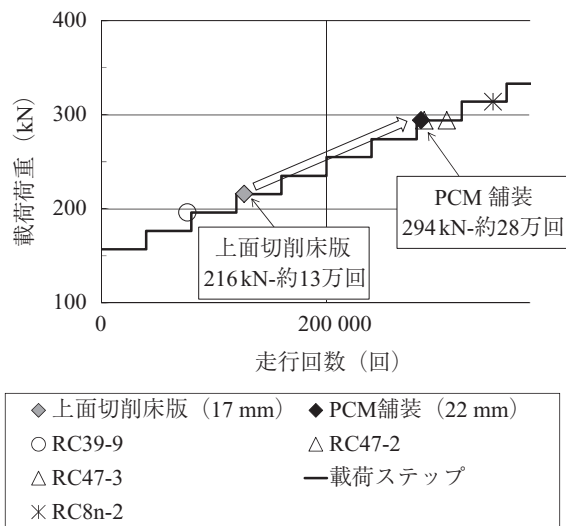


図 - 7 各床版における載荷荷重と破壊時走行回数の関係

3. PCM 舗装の実床版補修への適用

今回開発した PCM 舗装を用いて、平成 28 年 3 月から 10 月に首都高速道路 1 号上野線上り本線上において床版補修工事が行われた。詳細を以下に報告する。

3.1 施工対象と床版の状況

図 - 8 には、施工工区断面図の一例を示す。施工延長は約 330 m (施工面積: 約 2 200 m²) 左車線 16 スパン、右車線 16 スパン、合計 32 スパンである。当該範囲は、昭和 39 年に工事竣工し、建設後 51 年が経過した鋼単純合成桁の区間である。当工区のコンクリート床版は、1964 年の東京五輪の前に建設されており、設計床版厚が 160 mm ときわめて薄い。

表 - 6 輪荷重走行試験供試体寸法および配筋状況一覧⁵⁾

供試体名	適用示方書	供試体寸法 (mm)	支間 (mm)	主鉄筋 (mm)			配力鉄筋 (mm)		
				呼び径	有効高	間隔	呼び径	有効高	間隔
上面切削床版 *	昭和 39 年 鋼道路橋 設計示方書	2 800 × 4 500 × 170	2 500	D16 (D16)****	140 (10)	150 (300)	D13 (D10)	132 (23)	300 (300)
PCM 舗装 *		2 800 × 4 500 × 220***			190 (60)			182 (73)	
RC39-9**		2 800 × 4 500 × 190			160 (30)			146 (43)	
RC47-2,3**	昭和 47 年 道路橋示方書	2 800 × 4 500 × 200		D19 (D19)	160 (40)	125 (250)	D16 (D16)	142 (58)	100 (200)
RC8n-2**	平成 8 年 道路橋示方書	2 800 × 4 500 × 250		D19 (D19)	210 (40)	150 (300)	D16 (D16)	192 (58)	125 (250)

* 本試験供試体
 ** 既往試験供試体
 *** RC 床版の厚さ 170 mm + PCM 舗装の厚さ 50 mm
 **** () 内は、圧縮鉄筋を示す

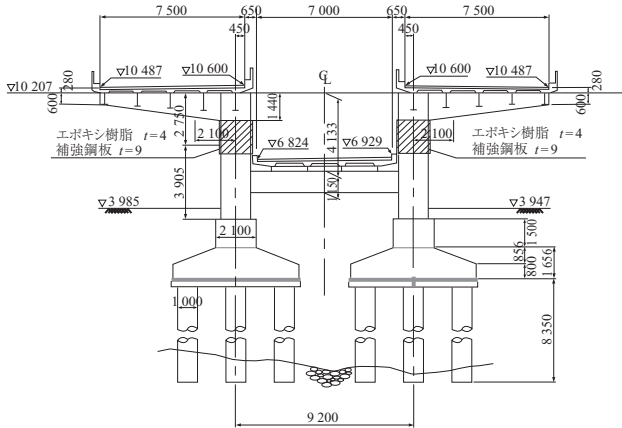


図 - 8 施工工区断面図

また当時の示方書は、最小配力鉄筋量が主鉄筋の 25 % と規定され、配力鉄筋量が少ない。床版下面は 1985 年に鋼板接着工法によって補強されたが、床版を支える主桁や横桁の上フランジ上面および接着された鋼板が腐食・膨張して、床版ハンチ部のコンクリートや鋼板の腐食片がはく落する事象が発生していた。これは床版に発生した貫通ひび割れから浸透した雨水や凍結防止剤によるものと考えられる。さらに当工区は、これまでの舗装打ち換えによって床版上面が切削機によって削られていることが考えられた。既設舗装を除去したところ、床版の上側鉄筋が表面に露出しており、設計厚さが 160 mm であるのに対し、120 mm 程度まで削られている箇所も存在した。

3.2 施工手順

図 - 9 には PCM 舗装施工フローの一部を示す¹⁾。舗装の切削後、浸透型防水剤を塗布し、既存床版への水分の浸入を遮断する。さらに既存 RC 床版と PCM モルタルの接着性を向上させるため、接着剤塗布工を経て PCM 打設を行った。

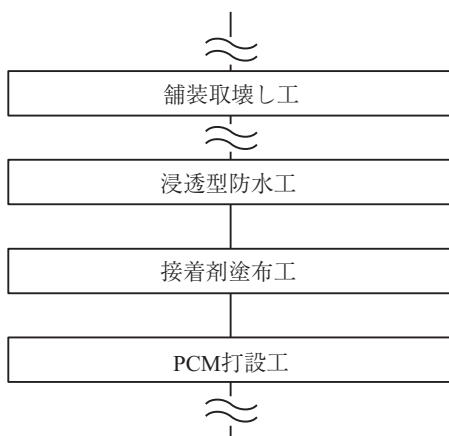


図 - 9 PCM 舗装施工フロー¹⁾ (抜粋)

(1) 浸透型防水工

浸透型防水材は、床版の表面含水率が 5 % 以下であることを高周波水分計で確認の上塗布を行った。浸透型防水

材は、既存 RC 床版のひび割れに浸透し、ひび割れを閉塞することで、劣化因子の浸入を防止する目的で塗布を行う。また、浸透型防水材塗布後に 4 号珪砂を表面に均一に散布することで、PCM モルタルとの接着性を高めている。

(2) 接着剤塗布工

PCM モルタルと既存床版の接着性を高めるため、接着剤塗布工ではエポキシ樹脂接着剤を用いた。エポキシ樹脂は主剤と硬化剤をムラなく混合し補修面全面に塗布した。

(3) PCM 打設工

実際の施工では、粉体のロータリーガンへの供給はサイロを用いて行った。専用ノズル内で練り混ぜされたモルタルは、減衰装置内で繊維投入機により投入された繊維と一体として床版へ打設した。打設されたモルタルは専用フィニッシャーで仕上げた。写真 - 5 にはフィニッシャーによる仕上げ状況を示す。専用フィニッシャーで仕上げたのち、約 1 時間後にモルタルの硬化開始を確認のうえ、養生シートによる養生を行った。養生シートは施工後 2 ~ 3 時間行い、モルタルの圧縮強度が 12 N/mm² 以上であることを確認した後に次工程であるアスファルト塗膜系防水工へ移る。



写真 - 5 専用フィニッシャーによる仕上げ状況

3.3 規制時間および施工量

交通規制開始から交通規制撤去までの時間は警視庁との協議で 16 時から翌 5 時の 13 時間となった。切削工や打設準備を終え、浸透型防水工から PCM の打設完了までは 18 時 ~ 21 時の約 3 時間で行われた。1 日の施工量は 3.25 m × 16.5 m × 5 ~ 8 cm で約 3 ~ 4 m³ であった。PCM 舗装の施工能力は約 4.0 m³/h であり、施工時間は約 1 時間であった。

工期完了近くでは 1 スパン 30 m の箇所での施工も行い、PCM 舗装の打設は約 100 分で完了した。施工を通して作業の効率化が図られ、全体の規制時間も当初は 13 時間であったが、最終的には 10 時間まで短縮された。

3.4 施工結果

表 - 6 には、実施工における品質管理試験結果の一例を示す。PCM 舗装は実施工においても、開発目標値を満たしていることを確認した。また、施工後の目視調査ではひび割れなどの損傷は見られず、次工程であるアスファルト塗膜系防水工へ順調に移行することができた。

表 - 6 品質管理試験結果

(a) フレッシュ性状

練上り温度 (℃)	凝結調整剤量 (粉体%)	可使用時間 (min)
21.5	0.17	50

(b) 硬化体物性

圧縮強度 (材齢 3 h) (N/mm ²)	圧縮強度 (材齢 28 d) (N/mm ²)	静弾性係数 (材齢 28 d) (kN/mm ²)
17.8	36.5	21.0

4. おわりに

RC 床版の新たな上面補修工法として、乾式吹付け工法を応用した「PCM 舗装」の開発を行った。

- 1) 開発した材料は早期交通開放のため、可使用時間を 60 分間確保したうえで、施工後 2 ~ 3 時間で実用強度に達する超速硬化性を有するものとした。
- 2) 既存 RC 床版へのたわみに追従するため、静弾性係数の低い材料とした。
- 3) RC 床版への劣化因子の浸入を防止するため透水抵抗性を有するものとした。
- 4) 輪荷重走行試験結果により、既存 RC 床版との十分な層間剥離抵抗性を有していることを確認した。また、

PCM 舗装の施工により疲労耐久性が向上することを確認した。

- 5) 実床版上での施工により、PCM 舗装は RC 床版補修工法として適用が可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 首都高速道路：舗装設計施工要領，2015.
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点 '15, p.68, 2015.
- 3) 日本規格協会：JIS A 1404 建築用セメント防水剤の試験方法, 1994.
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書, p.32, 1964.
- 5) 中谷昌一ら：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国土技術政策総合研究所資料, 2002.

脚 注

- a) W/B：水結合材比
- b) S/C：砂セメント比

謝 辞

PCM 舗装の開発にあたり株式会社 NIPPO には多大なるご協力を賜りました。この場をお借りし厚く御礼申し上げます。

【2016 年 12 月 27 日受付】



刊行物案内

第 25 回 プレストレストコンクリートの 発展に関するシンポジウム 論 文 集

(平成28年10月)

本書は、平成28年10月に北九州市（北九州国際会議場および西日本総合展示場）で開催された標記シンポジウムの講演論文集です。

CD 版論文集：定価 12,000 円，会員特価 8,000 円／送料 300 円
 体 裁：プラスチック CD ケース入り
 書籍版論文集：定価 12,000 円，会員特価 10,000 円／送料 500 円
 体 裁：B5 判，箱入り