

報告 PCM 舗装による RC 床版上面増厚工法に関する研究

青木 聡*1・蔵治 賢太郎*2・持田 泰子*3

要旨：建設後 40～50 年間供用されたコンクリート床版は、舗装打ち換え時に使用する切削機によって床版上面が削られ、床版内部に雨水等の劣化因子が浸入しやすい状況になっている。対策として床版の上面に SFRC を増厚する工法が採用されているが、施工に必要な移動式プラント車の確保が困難になっていることと、増厚した SFRC が既設床版との層間で剥離する事例が報告されている。本研究では移動式プラント車を使用することなく上面増厚の施工が可能となる乾式吹付け工法を応用した施工法および舗装の基層材として層間剥離が生じない超速硬型ポリマーセメントモルタル材料を開発した。

キーワード：コンクリート床版，ポリマーセメントモルタル，上面増厚

1. はじめに

首都高速道路では建設から 40～50 年が経過したコンクリート床版は、幾度も舗装を打ち換えたことにより、上面のかぶりコンクリートが舗装切削機により削られ、上面鉄筋が露出している事例が報告されている(写真-1)。上面が切削された床版は、鉄筋に雨水や凍結防止剤などの鋼材の腐食因子が浸透しやすくなっている。特に昭和 46 年以前の床版は、当時の設計基準の最小床版厚が薄い

ため、耐久性の低下が懸念される。ラントが被害を受けた東北地方などで需要があることや、近年、関東地方だけでなく中部、関西で鋼床版の疲労対策として SFRC 舗装を採用するケースが増えており、関東近郊で必要台数を確保することが困難となっている。

また、移動式プラント車から打設位置までの材料運搬は、作業員による一輪車を用いた手法が最も効率が良いとされているが、長時間におよぶ重労働であり、作業員の大きな負担になっている(写真-2)。

一方、他機関において、コンクリート床版の上面増厚が実施されているが、増厚した SFRC が既設床版から剥がれてしまう事象が生じている¹⁾。原因は、接着剤が使われていなかったこと²⁾、静弾性係数が既設床版より高い材料特性で既設床版とのたわみの追従性がなかったことと考えられている。

本稿では、これらの諸問題を解決するため、移動式プラント車を使わずに、打設位置への材料供給・打設・敷均しを効率的に行える施工法として、乾式吹付け工法を



写真-1 床版上面の鉄筋露出

床版の上面かぶりが薄くなった場合や鉄筋が露出している場合の対応方法として、SFRC による上面増厚工法(以下、上面増厚)や部分的な打ち換えが行われている。上面増厚をする場合、一般に供用中の路線では渋滞を回避するため車線規制を行って施工するため、一定時間内に完了することが求められる。そのため、SFRC の供給には、移動式プラント車(モバイル車)を使用するが、移動式プラント車は、東日本大震災によって定置プ



写真-2 一輪車を用いた SFRC の運搬

*1 (一財)首都高速道路技術センター 技術研究所第一研究開発室 係長 (正会員)

*2 首都高速道路(株) 技術部技術推進課 担当課長

*3 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 係長

応用した施工法の開発と、床版上面のかぶりを復旧する材料として、輪荷重が繰り返し作用しても既設床版との層間剥離やひび割れが生じることのない、付着力が高く速硬化のあるモルタルによる舗装（基層）材（図-1）を開発したので報告する。

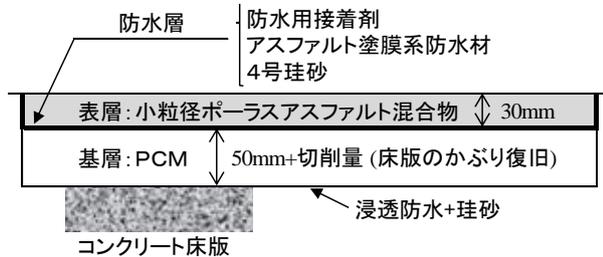


図-1 コンクリート床版上の舗装構成図

2. 施工方法の開発

2.1 乾式吹付け工法の特徴とその応用

乾式吹付け工法は、トンネル内面の断面補修工などに用いられる工法である（図-2）。ロータリーガンによる圧搾空気ではセメント粉体を、高圧ポンプを用いて液体材料を別々のホースで圧送し、粉体と液体を特殊先端ノズルの中で瞬時に混合して均一なポリマーセメントモルタル（以下、PCM）に練り上げ、ノズルから出てきたPCMを対象物に固着させる工法である。

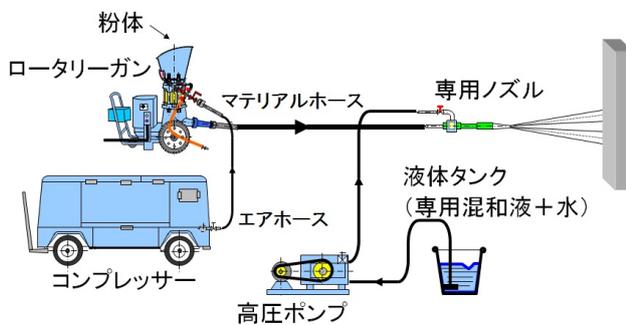


図-2 乾式吹付け工法のシステム構成

この施工法を応用することにより、移動式プラント車を使用せず、小規模な設備でPCMを瞬時に製造することができるうえ、200m以上離れた材料ヤードから打設位置まで材料を圧送することができる。

また、粉体と液体が別々のホースを通るため、湿式吹付け工法とは異なり、使用後のホースや機械設備内の清掃が不要となることから、作業時間やスペースに制約がある現場に向けた施工法である。

2.2 減速装置の開発

乾式吹付け工法をそのまま使用してPCMを打設した場合、リバウンドによって周辺や作業帯外に飛散する恐れがある。そこで、圧送したPCMの吹付け速度を落とす「減速装置」を開発した（図-3）。

す「減速装置」を開発した（図-3）。

乾式吹付け装置の先端ノズルを開発した減速装置に接続して材料を圧送すると、ノズルから減速装置の中に吹き込まれたモルタルが内壁に沿うように回転しながら摩擦抵抗で徐々に減速していく。圧送と混合に寄与した空気は装置の中心部から上面に抜けていく構造である。この減速装置と乾式吹付け工法を組み合わせることで、リバウンドすることなく、PCMを製造・運搬・打設できるようになる。また、減速装置の投入接続部には、PCMが固着しないように、パイプレータを設置した。

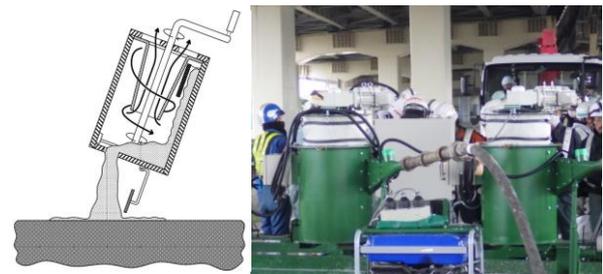


図-3 乾式吹付け工法のPCM減速装置

2.3 繊維投入機の開発

床版上面へ打設するPCMは、ひび割れ抑制を目的として、ビニロン繊維を投入することを検討した。

添加する繊維の種類は、ビニロン繊維、アラミド繊維、スチール繊維等、多くの種類が存在するが、本PCMに添加する繊維は、PCMのひび割れ防止を目的として、将来表層を打ち換える際に繊維の取り扱いが比較的容易となるビニロン繊維を添加することとした。添加量は、従来のSFRCの繊維添加量と同等とし、1.23vol%とした。繊維の投入方法は、当初、セメント粉体にプレミックスすることとしていたが、施工性試験の結果、材料ホース内で閉塞した。そのため、繊維をプレミックスせずに、材料混練後、添加する投入手法を検討した。開発した繊維投入機は、圧搾空気によってビニロン繊維を圧送する仕組みで、大型のプロワー2台によって減速装置に投入する。開発した繊維投入機を写真-3に示す。



写真-3 繊維投入機

繊維投入の仕組みは以下のとおりである。ブロワーで圧送されたビニロン繊維は、繊維専用のホースを通り、減速装置まで送られる。繊維用ホースは減速装置の材料投入口に接続され、セメント粉体と混練水が瞬時に練混ぜられた直後にビニロン繊維が添加される。

繊維長は、繊維投入機で圧送可能な6mm長とし、事前の施工性試験で圧送が可能であることを確認した。

減速装置内では練混ぜ用のスクリーナーが設置されているため、PCMとビニロン繊維が攪拌される。

繊維添加量は、事前の施工性試験でPCM打設前、打設中、打設完了で100gの試料を採取して、ビニロン繊維のみの重量から添加量を確認した。繊維添加量確認結果を表-1に示す。ビニロン繊維の添加量は、打設前から打設完了までバラツキは見られず、全体に渡って繊維が均一に添加されていることを確認した。

表-1 ビニロン繊維添加量確認結果

	打設前			施工50%進捗			打設完了		
試料No.	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
採取試料(g)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
繊維量(g)	0.92	0.81	0.87	1.01	0.91	0.92	0.72	0.91	1.18
繊維量(vol%)	1.34	1.18	1.26	1.47	1.32	1.34	1.05	1.32	1.72
Ave(vol%)	1.26			1.38			1.36		
Ave(vol%)	1.33								
設計(vol%)	1.23								

2.4 敷均し・締め固め工法の開発

PCMによる上面増厚は、床版上面のかぶりコンクリート復旧のほか、舗装の基層材になるため、平坦性は重要な性能の一つである。従来のSFRC舗装では、骨材を含んだコンクリートで、粘りが少ないことから角パイプ型スクリードのバイブレータで敷均すことができた。

しかし、PCMはポリマーエマルジョンを多く配合した材料であることから、ジェラートのような粘りがあり、角パイプ型スクリードの場合、敷均し時に接触面積が大きい材料が引きずられ、表面の性状が不良となり、コテ仕上げが必要な状態であった。



写真-4 新型フィニッシャーによる敷均し施工性試験

そこで丸パイプ型のスクリードに改良し、施工性試験を行ったところ、PCMの表面は平滑な性状となり、良好な仕上げ状態になった(写真-4)。

丸パイプ型のスクリードを用いたことで、平滑仕上げが可能となったとともに、コテ仕上げが不要になったため、現場での作業時間を縮小することができた。

なお、機械施工が困難である路肩周辺の端部の仕上げは、作業員によるコテ仕上げを行うこととした。

完成した施工システムの全体構成図を図-4に示す。

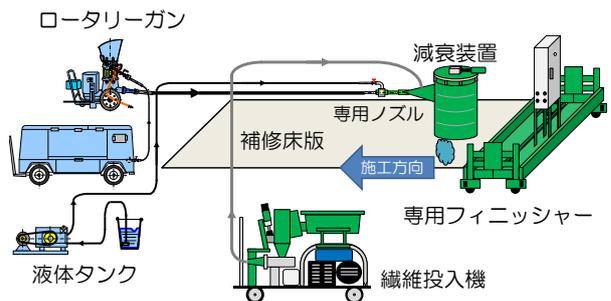


図-4 PCM増厚の施工システム全体構成

3. 材料の開発

3.1 乾式吹付け材料の特徴とその応用

乾式吹付け工法で使用される材料は、付着力向上・ひび割れ抑制および吹付け時の固着量を増大させること、粉じんとリバウンドの影響範囲を最小限にするため、ポリマーエマルジョンを配合したモルタルとしている。

また、吹付け対象物が天井・壁面等の場合もあるため、モルタルが自立することを目的に6mmの集束繊維を添加している。その他、マテリアルホース内にモルタルが固着・閉塞しないようにセメント粉体に粒径5mmの珪砂をプレミックスしている。そこで、本施工では乾式吹付け工法の基軸となるこれらの材料特性は生かしつつ、床版増厚材料として必要な性能に配慮した配合を検討することにした。

3.2 床版増厚材料として必要な要求性能

これまでSFRCによる上面増厚においては、既設RC床版から層間剥離した事例¹⁾が報告されている。従来、用いられてきたSFRCは、超速硬性の材料として既設コンクリート床版より圧縮強度・静弾性係数が大きく、既設床版のたわみに追従できないことが考えられている。

そこで新たに開発する材料については、既設RC床版へのたわみに追従可能な静弾性係数の低い材料の一つの重要な要求性能とした。静弾性係数が既設床版と同等程度であれば、新旧界面に生じるひずみ差が軽減されるため、層間剥離を抑制することができると考えた。

さらに、床版上面増厚の施工では、車線規制を伴うため、規制開放までの施工時間を短縮することが要求さ

れる。そのため、低弾性係数化に加えて、PCM 打設後に次工程に移行するため、首都高速道路「舗装設計施工要領」³⁾に基づき、打設完了後3時間で車両通行に耐えられる強度として設計基準強度の半分である12N/mm²以上の強度発現性を有する超速硬性をもう一つの要求性能とした。また超速硬性の材料にすることで、ワーカビリティが低下する懸念があったため、可使時間は60分に設定した。PCMの硬化体物性の目標値を表-2に示す。なお、コンクリート床版とPCMの層間剥離を防止するため、SFRCと同様にエポキシ系接着剤を塗布することとし、付着強度を1.0N/mm²以上とした。

表-2 PCM 開発目標値

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

既設床版とPCMの層間にひずみ差が生じないような物性であることが必要のため、圧縮強度を下げずに既設床版と同等な静弾性係数を目標として、普通コンクリートの静弾性係数より小さくなるような配合を検討した。

発現強度が40N/mm²前後の一般的なコンクリートの場合、静弾性係数が30kN/mm²前後になる⁴⁾。

供用後48年経過した床版の圧縮強度を測定したところ、40N/mm²を大きく上回る値であった⁵⁾。

従って、圧縮強度40N/mm²の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28kN/mm²以下となるように設定した。

なお、圧縮強度の要求性能は、静弾性係数を検討した際に得られた結果から材齢28日で24N/mm²以上とした。

表-3には開発したPCMの配合を示す。現場作業時間により調整可能なため配合例としている。

表-3 PCM 配合例

粉体 (超速硬セメント+ 混和材+砂) (kg/m ³)	ビニロン 繊維 (vol%)	ポリマー エマルジョン (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	W/B* (%)
1,890	1.23	90	142	25

★W/B:水結合材比

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調整された乾燥珪砂(5mm)を添加する。

4. PCMの性能評価

4.1 圧縮強度および静弾性係数

配合検討したPCMの圧縮強度と静弾性係数の測定を

JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」に基づき、供試体寸法をφ10x20cmとし、供試体採取翌日に脱型後、室温20℃相対湿度90%以上で湿空養生とした試験体で実施した。試験結果を図-5に示す。PCMの試験体82本の測定結果をプロットしている。

この結果から、PCMはコンクリートと比較して、圧縮強度が30~45N/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。

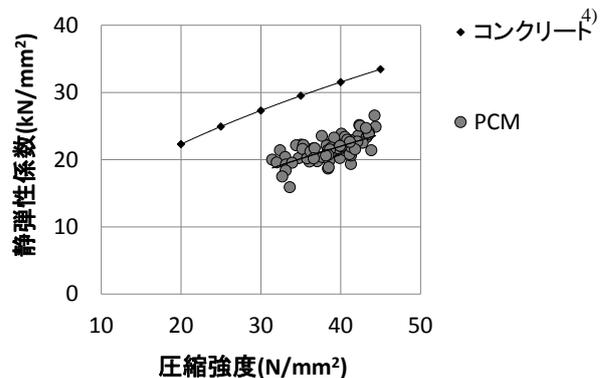


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

輪荷重走行試験用試験体で使用したPCMの測定結果(硬化体物性)を表-4に示す。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は表-2で示した目標を満足することができた。

表-4 PCMの硬化体物性

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

4.2 フレッシュ性状の確認

材料のフレッシュ性状は、勾配のある床版上面にも、流動しない粘性を有し、平たんに仕上げられるワーカビリティを確保する必要がある。勾配8%の平板型枠を3体製作し、スランプを変えた3種のモルタルで流動性と施工性をJIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」に基づき施工性試験で確認した。耐流動性と施工性が良好なスランプは、10cm前後であることを確認した。従って、スランプの品質管理目標を10cm±3cmを標準として設定した。

4.3 凝結遅延剤の添加量確認

PCM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時間が変動する。そのため、凝結時間の調整は、図-6に示すように各外気温に応じて凝結調整剤添加量を調整することとした。

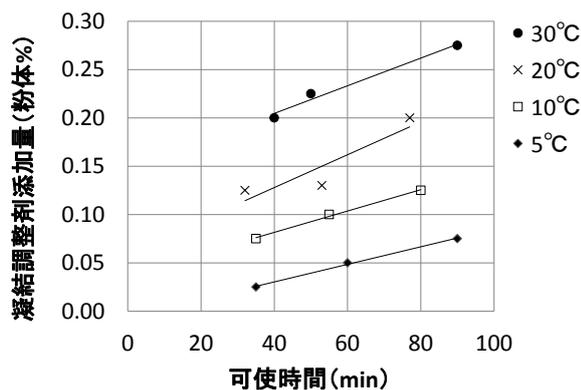


図-6 各温度における凝結調整剤添加量

凝結遅延剤の添加量は、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、夏期、冬期ともに可使用時間 60 分を目標に調整した。

5. PCM 増厚床版の耐久性評価

5.1 輪荷重走行試験の概要

開発した PCM について、既設床版との層間剥離の有無、破壊形態、増厚した床版の耐久性を評価するため、RC 床版が疲労押抜きせん断破壊に至るまでの輪荷重走行試験を実施した。首都高速道路では、昭和 47 年以前の基準で設計されている床版は、床版下面を補強しており、本研究では舗装打ち換えによって薄くなった床版のかぶりを復旧する手法の開発が目的であるため、輪荷重の作用により層間剥離が発生しないか、どのような破壊形態となるのかを把握するために試験を行った。あわせて輪荷重走行回数によって床版の耐久性を評価した。

本試験は、既往の国土技術政策総合研究所（以下、国総研）の試験結果⁶⁾と比較するため、昭和 39 年制定の鋼道路橋設計示方書に基づき RC 床版（以下、S39 道示床版）を製作して使用した。

輪荷重走行試験は、鋼製の載荷板（200×500mm）を床版上面の橋軸方向に敷き並べて、その上の鋼板上を鉄輪が 3.0 m（±1.5 m）往復移動するもので、載荷速度は 34 回/分（17rpm）である。

載荷荷重は、これまでの実績を踏まえ、道示⁸⁾に示されている 157kN（16tf）から開始して 4 万回毎に 20kN（2tf）ずつ荷重を上げていく階段状載荷で行った。

5.2 試験体の概要

輪荷重走行試験は、比較のための試験体を含めて、以下の 3 体を製作して実施した。

(1) 試験体 (a) 上面かぶり 20mm 切削版 床版厚 170mm

「昭和 39 年鋼道示」に基づき製作した厚さ 190mm の床版上面を 20mm 切削した（多くの舗装打ち換えによって床版上面のかぶりコンクリートが薄くなっている現状の床版を模擬）（図-7）。

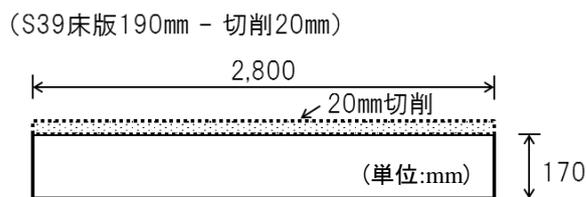


図-7 試験体 (a) の構成図

(2) 試験体 (b) PCM ビニロン繊維添加 床版厚 220mm（乾燥）
「昭和 39 年鋼道示」に基づき製作した厚さ 190mm の床版上面を 20mm 切削して、その上に厚さ 50mm の PCM を打設した（図-8）。

(S39床版190mm-切削20mm+PCM舗装50mm)

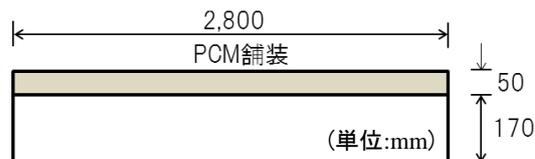


図-8 試験体 (b) の構成図

(3) 試験体 (c) PCM ビニロン繊維添加 床版厚 220mm（水張）
増厚する PCM の仕様・構成は、試験体 (b) と同様で、浸入水の影響を把握するため目地部から水が入り込むように意図的に目地を設けて PCM を打設した。PCM の打設順序を図-9 に示す。

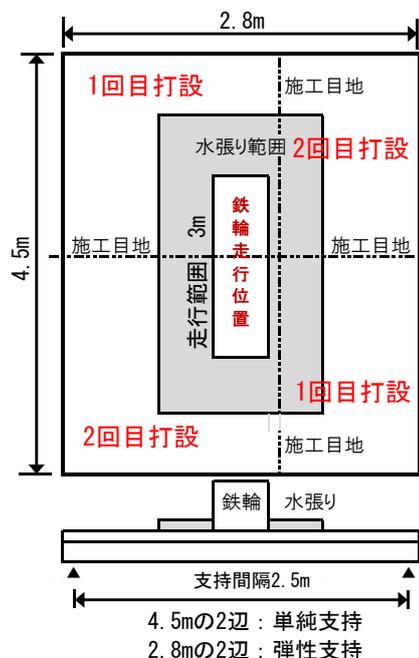


図-9 施工目地位置と荷重載荷位置、施工目地設置のための打設順序図

5.3 試験の結果（破壊時走行回数）

輪荷重走行試験の結果を表-5 に示す。

表-5 輪荷重走行試験結果

	床版厚 mm	載荷荷重		破壊時 走行回数(回)
		kN	tf	
(a)上面かぶり20mm切削版	170	215.7	22	147,000
(b)PCM ビニロン繊維添加(乾燥)	220	294.2	30	318,645
(c)PCM ビニロン繊維添加(水張り)	220	274.6	28	258,649

PCMを増厚した試験体(b)は、たわみ量が2mmを超えた時点でもPCM上面にひび割れは確認されず、294kN(たわみ3mm)でPCM上面に橋軸直角方向のひび割れが見られ、318,645回で疲労押抜せん断破壊に至った。PCMと既設床版の付着性については適宜、テストハンマーでタタキ点検を行ったが、層間剥離は発生しなかった。

5.4 等価繰り返し回数の算出

本試験において、階段状載荷で実施した各試験体の試験結果からS-Nの関係式(1)および(2)(松井式)⁷⁾を用いて、156.9kN換算の等価繰り返し回数を算出した。各試験体の156.9kN換算の等価繰り返し回数を表-6に示す。既往のS-N曲線(松井式)

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = -0.07835 \times \text{Log}N + \text{Log}1.51965(\text{乾燥}) \cdots \text{式}(1)$$

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = -0.07835 \times \text{Log}N + \text{Log}1.23660(\text{水張り}) \cdots \text{式}(2)$$

表-6 強度補正後の157kN等価繰り返し回数

試験体名	強度補正前の 等価繰り返し 回数(回)	27N/mm ² 補正 等価繰り返し回数 (回)	比率
試験体(a) 上面かぶり20mm切削版	2,482,382	1,319,699	1
試験体(b) PCM(ビニロン)増厚(乾燥)	198,429,154	92,921,865	70
試験体(c) PCM(ビニロン)増厚(水張り)	53,596,222	24,379,079	18

上面のかぶりを20mm切削した試験体(a)を基準として繰り返し回数を整理した場合、試験体(b)は70倍の繰り返し回数となった。試験後、解体調査を行った結果、試験体(b)は試験体(a)に比べてひび割れ本数が少なく、ひび割れ範囲が分散していたため、ひび割れ抑制効果や応力分散効果が期待できることが確認できた。

5.5 階段状載荷時の載荷荷重と破壊回数との関係

本試験結果に強度補正後の関係を図-10に示す。

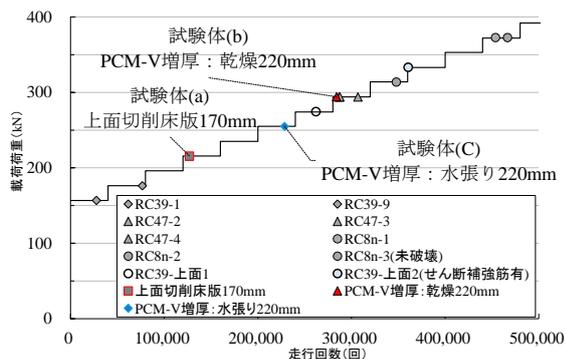


図-10 階段載荷における載荷荷重と破壊時走行回数

ここでは、既往の国総研の結果⁶⁾(S39道示床版, S47道示床版, H8道示床版)もあわせて整理している。

試験体(b)PCM増厚版(乾燥)は、294.2kNの38,645回(累計318,645回)で破壊に至り、既往のS47道示床版と概ね同等の耐久性を有している結果が得られた。

以上から、輪荷重走行試験の結果、試験体(b)は、S47道示床版の耐久性を有していることが確認できた。

6. まとめ

開発したPCM舗装の施工法と材料を使用して安定的な材料供給と敷均しが可能か、事前の施工性試験を踏まえ、高速道路上で現場施工を進めた。現場施工の結果、スランプ11.5cm、圧縮強度(3h)18.8N/mm²の結果となり、管理値を満足することを確認した。一週間規制帯内での施工となることから13時間施工として進め、当初15m/夜間であったが、作業手順の効率化が図られ、最終的には45m/夜間の能率となった。

7. おわりに

本研究は、床版上面のかぶりを復旧する手法として開始したが、今後は、劣化度を与えた床版に対しての増厚補強効果を輪荷重走行試験によって検証する予定である。

高速道路上の現場施工は、一期施工として約40スパンを施工したが、今後も舗装の打ち換えの際、コンクリート床版区間については床版上面が切削されていることが考えられるため、本工法を適用していきたい。

参考文献

- 1) 中央道 諏訪南～諏訪間におけるコンクリート床版の補修, 中日本高速道路(株)八王子支社, EXTEC No.81, pp.39-41, 2007
- 2) 長谷俊彦, 和田圭仙, 後藤昭彦: 上面増厚床版における劣化要因の検証と耐久性向上対策の検討, コンクリート工学, Vol.50, No.3, pp.245-253, 2012.3
- 3) 首都高速道路株式会社, 舗装設計施工要領, 2015
- 4) コンクリート技術の要点'15, 日本コンクリート工学会, pp.68, 2015
- 5) 蒲和也, 増井隆: 48年供用されたRC床版の載荷試験報告, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014.9
- 6) 中谷昌一, 内田賢一, 西川和廣, 神田昌幸, 宮崎和彦, 川間重一ほか: 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, 国総研資料第28号, 2002.3
- 7) 松井繁之, 木村元哉, 養毛勉: 増厚工法によるRC床版補強の耐久性評価, 構造工学論文集(土木学会), Vol.38A, pp.1085-1096, 1992.3
- 8) 道路橋示方書(鋼橋)平成24年3月 日本道路協会