

論文

道路橋床版の長寿命化を目的とした橋面コンクリート舗装に関する検討

橋本雅行^{*}，山本誠^{**}，渡邊宗幸^{***}，岸良竜^{****}，小森篤也^{*****}，三田村浩^{*****}

^{*} (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

^{**} 博 (工)，住友大阪セメント (株) 建材事業部 (〒274-0082 千葉県船橋市大神保町 1357-1)

^{***} (株) トクヤマ セメント開発グループ (〒299-0842 千葉県袖ヶ浦市南袖 10)

^{****} 太平洋セメント (株) 中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

^{*****} 博 (工)，日鉄ケミカル&マテリアル (株) (〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1)

^{*****} 博 (工)，(株) サンブリッジ (〒001-0025 北海道札幌市北区北 25 条西 4 丁目 1-26)

橋面コンクリート舗装は、アスファルト舗装と比較し、道路橋床版の耐荷性・疲労耐久性の向上による長寿命化が見込まれ、それ自身の耐久性も高く修繕の頻度も少なくなることからライフサイクルコストの観点でも有利となることが期待されている。本検討では、橋面コンクリート舗装技術を確認するための共通試験を実施し、施工性・強度発現性・走行性・床版との一体性を評価した。その結果、各技術は実橋においても十分に適用できる技術レベルにあると判断した。

キーワード：橋面コンクリート舗装，道路橋床版，長寿命化，共通試験

1. はじめに

橋面コンクリート舗装は、アスファルト舗装と比較し、道路橋床版の耐荷性・疲労耐久性の向上による長寿命化が見込まれ、それ自身の耐久性も高く修繕の頻度も少なくなることからライフサイクルコストの観点でも有利となることが期待されている。また、この技術は、従来の床版防水層やアスファルト舗装を設置しないため、水や塩分の侵入を抑制する物質浸透抵抗性や路面として供用できる走行性を確保することが必要であり、既設床版と一体となるように施工することが前提となる。しかしながら、日本における橋面コンクリート舗装技術は確立されておらず、わが国では検討段階にあるのが実情である。

そこで、土木学会鋼構造委員会「道路橋床版の点検診断の高度化と長寿命化技術に関する小委員会」(以下、委員会)では、特に地方部の中小橋梁への適用を想定し、橋面コンクリート舗装技術を確認するための共通試験を実施した。共通試験を実施したコンクリートは、橋面コンクリート舗装に適合すると考えられる材料を公募し、計5材料を選定した。なお、コンクリートの製造および施工は公募に参加した各社が行うこととし、各技術の評価については、施工性を確認するとともに、強度発現性、走行性、床版を模擬したコンクリートとの一体性を評価した。本稿は、共通試験で得られた各種の知見から、実橋への適用性を検討したものである。

2. 検討概要

2.1 コンクリートの種類

公募により選定した橋面コンクリート舗装技術の一覧を表-1 に示す。選定されたコンクリートは、セメント系が4材料、レジン系が1材料となる。以下に、各材料の詳細を述べる。

(1) 早強型低収縮性繊維補強コンクリート

早強型低収縮性繊維補強コンクリートは、早期強度発現性と低収縮性を付与した特殊セメントを配合した特殊コンクリートである。標準期において、床版コンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 を材齢24時間で達成する。また、JISA6909 に準じた透水試験の結果では、材齢7日後においても透水量が 1mL 程度と少なく、優れた物質浸透抵抗性も有しており、輪荷重走行試験においても床版の疲労耐久性が向上することも確認されている¹⁾。なお、エポキシ樹脂系接着材の全面塗布を標準としている。

(2) 超速硬型高靱性繊維補強コンクリート

超速硬型高靱性繊維補強コンクリートは、曲げたわみ硬化特性を有する繊維補強コンクリートであり、3時間で 24N/mm^2 以上の圧縮強度を発現する早期強度発現性や、乾燥収縮が小さく既設床版との良好な一体性などを特長とする。なお、エポキシ樹脂系接着材を全面塗布することを標準としており、適用する接着材は、道路橋床版防水便覧に示す防水性試験IIにおいて、水の浸透を止めることを確認しているものである。

表-1 橋面コンクリート舗装技術の一覧

コンクリートの種類	最小施工厚 (mm)	打設面の処理※1	表面処理	24N/mm ² 発現時間	圧縮強度※3 (N/mm ²)	スランプ (cm)	備考
A 早強型低収縮性繊維補強 コンクリート (セメント系)	40	SSB処理※2 + エポキシ系接着材	ホウキ目 仕上げ	24時間	24N/mm ² 以上	10±2.5	低収縮性と早強性を有する特殊セメントと有機繊維を配合した繊維補強コンクリート
B 超速硬型高靱性繊維補強 コンクリート (セメント系)	30	SSB処理 + エポキシ系接着材	ホウキ目 仕上げ	3時間	60N/mm ² 程度	12±2.5	有機繊維を配合した超速硬型繊維補強コンクリート
C 速硬型ラテックス改質 コンクリート (セメント系)	40	SSB処理 + 浸透性エポキシ系プライマー + エポキシ系接着材	ホウキ目 仕上げ	6時間	70N/mm ² 程度	16~22	速硬コンクリートとSBR系ラテックスを組み合わせた速硬型のLMC
D ポリエステルポリマー コンクリート (レジン系)	40	SSB処理 + ビニルエステル系プライマー	硬質骨材 散布仕上げ	6時間	50N/mm ² 以上	12±2.5	ポリエステルポリマーを細骨材・粗骨材と混合したコンクリート
E 超緻密高強度繊維補強 コンクリート (セメント系)	20	WJ処理 + 水湿し	すべり止め 舗装仕上げ (翌日施工)	2時間	130N/mm ² 以上	11~30*4	超緻密、高強度、高靱性、高耐久性を有するセメント系複合材料

※1 SSB処理：スチールショットブラスト処理，WJ処理：ウォータージェット処理
 ※2 あるいは研削機等によるレタンス除去
 ※3 材齢28日における圧縮強度
 ※4 フロー値

(3) 速硬型ラテックス改質コンクリート

速硬型ラテックス改質コンクリート(速硬型 LMC)は、カルシウムアルミネート系の速硬性混和材の使用により早期強度発現性を有している。また、SBR ラテックスの混和により曲げ強度や付着強度といった力学性能が向上し、物質浸透抵抗性にも優れたコンクリートであり²⁾、輪荷重走行試験においても床版の疲労耐久性が向上することも確認されている材料である³⁾。なお、エポキシ樹脂系接着材の全面塗布を標準としている。

(4) ポリエステルポリマーコンクリート

ポリエステルポリマーコンクリートは、不飽和ポリエステル樹脂を結合材に用いたレジンコンクリートであり、一般的に用いられる砕石や乾燥珪砂を骨材として用い、必要に応じて着色も可能である。6時間で60N/mm²以上の圧縮強度を発現することも特徴である。また、レジン結合材に用いていることから、高い物質浸透抵抗性も期待でき、乾燥収縮がなく既設床版との良好な一体性、一般的なセメントコンクリートの2倍以上となる約9N/mm²の引張抵抗性を有している。なお、ビニルエステル樹脂系プライマーの全面塗布を標準としている。

(5) 超緻密高強度繊維補強コンクリート

超緻密高強度繊維補強コンクリートは、標準配合では1日で100N/mm²程度、超早強型配合の場合は2時間で24N/mm²以上の強度を発現する。透気係数が0.001×10⁻¹⁶m²以下と物質浸透抵抗性に非常に優れ、補強用鋼繊維(メゾ、マイクロ)を5vol%と大量に混入させることで曲げ応力や引張応力も負担することから、ひび割れ抵抗性にも優れている高耐久性のセメント系材料である。また、実橋における載荷試験で床版の耐荷性の向上が確認

されており⁴⁾、輪荷重走行試験においても疲労耐久性の向上が確認されている材料でもある⁵⁾。なお、ウォータージェット(以下、WJ)による下地処理を標準としており、接着材は用いない。

2.2 フィールド構築および下地処理

共通試験は、(一社)日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所の構内において、図-1の構成断面で施工フィールドを構築して実施した。橋面コンクリート舗装の下地となる模擬床版は、一般的なコンクリート床版に使用される配合条件(呼び強度:24N/mm²、スランプ:8cm、粗骨材の最大骨材寸法:25cm)とし、養生期間を短縮するために早強ポルトランドセメントを用いた無筋コンクリート版とした。施工状況を写真-1に、品質管理試験結果を表-2に示す。なお、橋面コンクリート舗装の施工面積は、1材料あたり15m²(3m×5m)程度とした。

橋面コンクリート舗装技術の既設床版への適用を想定し、模擬床版の下地処理を実施した。下地処理は、適用条件に近い上面増厚工法の施工で一般的な下地処理を施すものとし、スチールショットブラスト(以下、SSB)(投射密度:150kg/m²)を実施した。下地処理状況を写真-2に示す。CTメーターで計測した処理後のきめ深さは0.6mm程度であった。なお、施工前に追加で処理を施したWJ後のきめ深さは2.5mm程度であった。

2.3 評価方法

共通試験における評価としては、公募に参加した各社が各材料の製造および施工を行い、施工に要する時間と施工環境下で作製したサンプルの強度発現性を確認す



図-1 施工フィールドの構成断面

表-2 模擬床版の品質管理試験結果

項目		試験結果	管理基準	試験方法
フレッシュ性状	コンクリート温度	27°C	-	温度計
	スランプ	7.5cm	8cm±2.5cm	JIS A 1101
	空気量	3.5%	4.5%±1.5%	JIS A 1128
圧縮強度	材齢7日	35.5N/mm ²	24N/mm ² 以上	JIS A 1108
静弾性係数	材齢7日	27.7kN/mm ²	-	JIS A 1149

※施工時の外気温32°C



a) コンクリートの打込み



b) 施工後の外観



a) SSB 処理



b) SSB 処理後の外観

写真-1 模擬床版の施工状況

写真-2 下地処理状況

ることで、実橋での施工が可能か否かを判断することとした。その後、施工フィールドにおいて、各種の性能確認試験を行うことで実橋への適用性を検討した。橋面コンクリート舗装は、床版の耐荷性および疲労耐久性を向上させ、物質浸透抵抗性および走行性を有することが必要であり、床版との一体性も要求されるものである。本試験においては、これらの中で走行性と床版との一体性の2項目について、性能確認試験を実施することとした。このことは、本試験は材料自体の物性を評価することよりも、下地状態や施工に起因した性能を評価することに重点を置いたことによるものである。

3. 共通試験結果

3.1 施工性および強度発現性の評価

共通試験における橋面コンクリート舗装の施工時間および品質管理試験結果を表-3に、施工状況を写真-3に示す。施工時期は7月下旬～8月上旬であり、気温30°Cを上回る環境下での施工であったにも関わらず、いずれの材料も概ね計画どおりの施工を行うことができた。施工時間については、施工面積が15m² (3m×5m)の条件下において、セメント系材料は1時間程度、レジン系材料は3時間程度であった。ただし、超緻密高強度繊維補強コンクリートの上面に施工するすべり止め舗装は、翌日の施工であった。

また、交通開放が可能な圧縮強度を床版コンクリートの設計基準強度24N/mm²と想定した場合、各材料の施工時間と圧縮強度試験の結果から、強度発現に要する時間は材料ごとに差異はあるものの、いずれの材料においても、製造や施工のための準備時間なども含め、小規模橋梁であれば十分に施工可能な材料であると判断した。な

お、静弾性係数については、速硬型ラテックス改質コンクリートとポリエステルポリマーコンクリートの2材料が比較的小さい傾向であった。

3.2 走行性の評価

橋面コンクリート舗装の走行性は、一般的な橋面舗装と同様にひび割れ・わだち掘れ・平坦性・すべり抵抗性などに着目して評価されるものである。しかしながら、本試験においては、表面仕上げに硬質骨材を散布して材料の目視観察ができない材料があること、交通荷重による負荷を再現しないこと、施工延長が短いことなどから、ひび割れ・わだち掘れ・平坦性による各材料の相対評価は難しいと判断し、一様な条件で相対評価が可能なすべり抵抗性に着目して、走行性を評価することとした。すべり抵抗性の評価については、振り式スキッドレジスタンスステータおよび回転式すべり抵抗測定器 (DF テスタ) によるすべり抵抗測定を実施した。

振り式スキッドレジスタンスステータによるすべり抵抗値 (BPN) の測定結果を図-2に示す。BPNは、舗装調査・試験法便覧における補正式⁹⁾ (1) を用いて温度補正を行った結果である。

$$C_{20} = -0.0071t^2 + 0.9301t - 15.79 + C_t \quad (1)$$

ここに、C₂₀: 20°Cに補正したBPN, C_t: 路面の表面温度 t°Cの時のBPN, t: 路面の表面温度(°C)

参考までに、BPNによる評価を用いた例として、舗装設計施工指針では「舗装材料のすべり抵抗性に関して湿潤路面で歩行者や自転車がすべりやすさを感じない抵抗値の目標としてBPNで40以上とすることがある」とき

表-3 橋面コンクリート舗装の施工時間および品質管理試験結果

コンクリートの種類	施工時間	フレッシュ性状	基本物性
A 早強型低収縮性繊維補強 コンクリート (セメント系)	13:20 接着材の混合・塗布開始 13:25 コンクリート製造開始(モービル車を使用) 13:35 コンクリート打込み開始(簡易フィニッシャを使用) 14:45 仕上げ終了 施工時間:1時間25分	練上り温度:38.0℃ スランプ:8.6cm 空気量:3.8% 施工時の外気温:34.0℃	圧縮強度(24hr):36.8N/mm ² 圧縮強度(28day):62.7N/mm ² 静弾性係数(28day):35.2kN/mm ²
B 超速硬型高靱性繊維補強 コンクリート (セメント系)	11:20 接着材の混合・塗布開始, コンクリート製造開始(移動式ミキサーを使用) 11:25 品質管理試験 11:30 コンクリート打込み開始(振動式締固め装置を使用) 12:15 仕上げ終了 施工時間:0時間55分	練上り温度:37.0℃ スランプ:16.0cm 空気量:2.4% 施工時の外気温:32.4℃	圧縮強度(3hr):21.0N/mm ² 圧縮強度(28day):71.9N/mm ² 静弾性係数(28day):39.9kN/mm ²
C 速硬型 ラテックス改質 コンクリート (セメント系)	9:00 プライマー混合・塗布開始, コンクリート製造開始(移動式ミキサーを使用) 9:06 接着材の混合・塗布開始 9:15 コンクリート打込み開始(パイプレーターを使用) 9:55 仕上げ終了 施工時間:0時間55分	練上り温度:39.5℃ スランプ:18.5cm 空気量:3.1% 施工時の外気温:32.7℃	圧縮強度(6hr):30.3N/mm ² 圧縮強度(28day):63.3N/mm ² 静弾性係数(28day):27.7kN/mm ²
D ポリエステル ポリマー コンクリート (レジン系)	9:30 プライマー混合・塗布開始 10:30 コンクリート製造開始(小型ミキサーを使用) 11:00 コンクリート打込み開始(振動式締固め装置を使用) 11:45 硬質骨材散布開始 12:15 仕上げ終了 施工時間:2時間45分	練上り温度:40.0℃ スランプ:22.0cm 施工時の外気温:38.8℃	圧縮強度(6hr):64.5N/mm ² 圧縮強度(28day [※]):82.1N/mm ² 静弾性係数(28day [※]):21.5kN/mm ² <small>※翌日作製, 同環境養生供試体使用</small>
E 超緻密高強度 繊維補強 コンクリート (セメント系)	9:30 コンクリート製造開始(移動式ミキサーを使用) 9:40 コンクリート打込み開始(簡易フィニッシャを使用) 10:10 コンクリート打込み終了 (翌日)すべり止め舗装の施工 施工時間:0時間40分 (すべり止め舗装を除く)	練上り温度:45.4℃ フロー値:11.3cm 空気量:2.4% 施工時の外気温:35.9℃	圧縮強度(6hr):81.7N/mm ² 圧縮強度(28day):144.4N/mm ² 静弾性係数(28day):36.6kN/mm ²



a) 早強型低収縮性繊維補強コンクリート



b) 超速硬型高靱性繊維補強コンクリート



c) 速硬型ラテックス改質コンクリート



d) ポリエステルポリマーコンクリート



e) 超緻密高強度繊維補強コンクリート

写真-3 橋面コンクリート舗装の施工状況

れており、地方自治体などで準用されている。車道部のすべり抵抗値は、NEXCO規格ではBPNで60以上(暫定運用)とされており⁸⁾、維持修繕で舗装を切削オーバーレイした後の管理として実施されている。

BPNの測定結果については、施工後および施工1年後においても、全ての材料は60以上を有しており、歩道および車道の参考となる目標値を満足していた。路面として供用できるすべり抵抗性を有していると判断できる。

DFテスタによるすべり抵抗値(動的摩擦係数)の測定結果を図-3に示す。動的摩擦係数は、地方の小規模橋梁での適用を想定し、30km/hの条件で測定をしている。

参考までに、動的摩擦係数による評価を用いた例として、NEXCO規格では、新設におけるコンクリート舗装

版の管理基準値は80km/hの条件で0.35以上(暫定運用)が設定されている⁸⁾。

動的摩擦係数(30km/h)の測定結果については、全ての材料は0.3以上を有しており、その中でも路面に硬質骨材を付着させている材料(D,E)においては、0.7以上と高い値を示していた。参考となる目標値はないものの、上記の高速道路における管理基準値を考慮すれば、30km/hの条件で0.3以上という値は、実用上において問題のないレベルであると思われる。

以上のことから、BPNおよび動的摩擦係数の両方の観点で評価をした結果、施工後および施工1年後においても、共通試験を実施した全ての材料はすべり抵抗性を確保できているものと考えられる。なお、BPNと動的摩擦

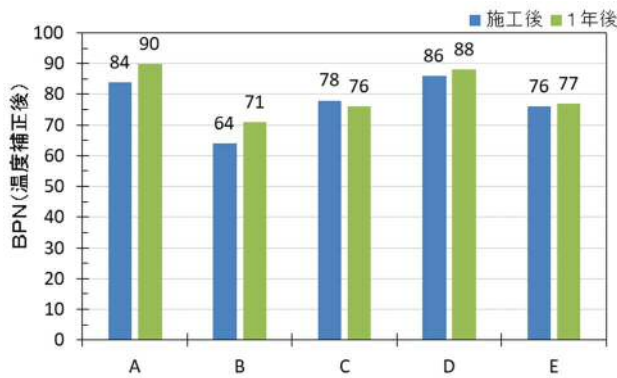


図-2 すべり抵抗値 (BPN) の測定結果

係数の傾向が一致しないことについては、BPNは局所的な仕上げ面を評価対象としており素材自体の影響も受けやすいこと、動的摩擦係数はBPNと比較して掃目を跨ぐような広範囲が評価対象であることなどが要因として考えられる。

3.3 床版との一体性の評価

床版との一体性の評価については、建研式引張接着試験および一面せん断試験を実施した。いずれの試験も床版との一体性を評価するものであり、建研式引張接着試験は施工後および施工1年後に施工フィールド上で実施し、せん断試験は施工1年後に施工フィールドからコア採取して室内で実施した。

建研式引張接着試験の結果を図-4に示す。引張接着強度については、施工1年後の時点において、5材料のうち最も低い材料でも2.13N/mm²であり、全体的に高い強度を有していた。試験後に観察した破壊形態では、早強型低収縮性繊維補強コンクリートとポリエステルポリマーコンクリートについては、下地コンクリートの破壊、材料破壊、接着材近傍での破壊など、破壊形態は3パターンあり、バラツキも確認された。超速硬型高韌性繊維補強コンクリートについては、下地コンクリートの破壊、材料破壊の2パターンであった。速硬型ラテックス改質コンクリートと超緻密高強度繊維補強コンクリートは、全て下地コンクリートの破壊であった。

参考までに、引張接着強度により下地コンクリートとの一体性を評価している例として、NEXCO規格では、増厚コンクリート用エポキシ樹脂接着材の規格値が1.0N/mm²以上⁹⁾とされている。このことや破壊形態に下地コンクリートの破壊があったことを考慮すれば、2.0N/mm²以上という値は、実用上において問題のない試験結果と考えられ、各材料は下地コンクリートとの一体性を確保しているものと考えられる。

つぎに、せん断試験の状況を写真-4に、せん断試験用治具を図-5に、せん断試験の結果を図-6に示す。せん断強度については、施工1年後の時点において、5材料のうち最も低い材料でも4.81N/mm²であり全体的に高い強度を有していた。試験後に観察した破壊形態で

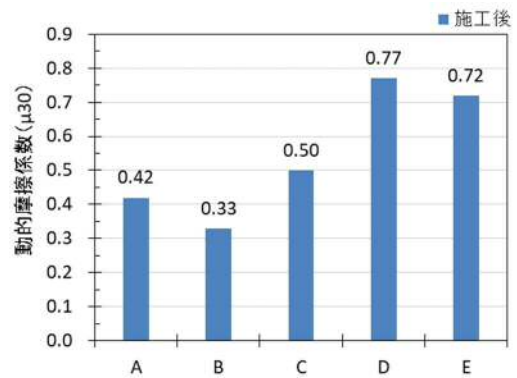


図-3 動的摩擦係数 (30km/h) の測定結果

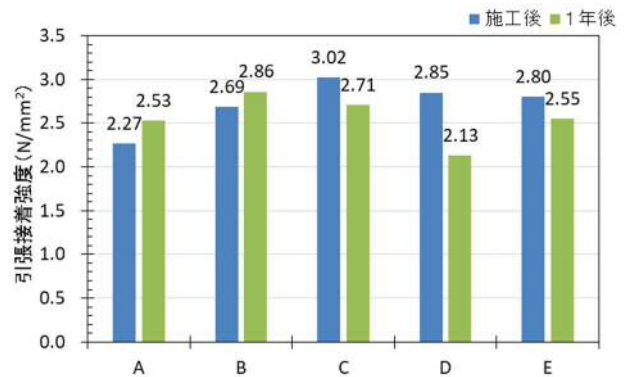


図-4 引張接着強度の測定結果

は、ほとんどが下地コンクリートの破壊と材料破壊が混在した形態であった。なお、超速硬型高韌性繊維補強コンクリートと超緻密高強度繊維補強コンクリートにおいては、試験機の最大荷重を超えた段階(せん断強度が6.4N/mm²程度の段階)で停止して破壊するまで試験ができなかった供試体もあるため、実際には更に高いせん断強度であったと推察される。

参考までに、既往のせん断強度の評価式により、一般的な床版コンクリートの圧縮強度として24N/mm²を用いたせん断強度を算出した。その結果、円柱試験体の一面せん断試験から求められた阿部らの式¹⁰⁾(2)では4.78N/mm²であった。このことから、せん断強度が最も低い材料でも4.81N/mm²であったことを考慮すれば、全ての材料は床版コンクリートのせん断強度の理論値と同等以上のせん断強度を有していると推察され、各材料は下地コンクリートとの一体性を確保しているものと考えられる。

$$f_{cvo} = 0.688f_c^{0.610} \quad (2)$$

ここに、 f_{cvo} : コンクリートのせん断強度(N/mm²),
 f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

以上のことから、引張接着強度およびせん断強度の両方の観点で評価をした結果、施工後および施工1年後においても、共通試験を実施した全ての材料は床版との一体性を確保できているものと考えられる。



写真-4 せん断試験の状況

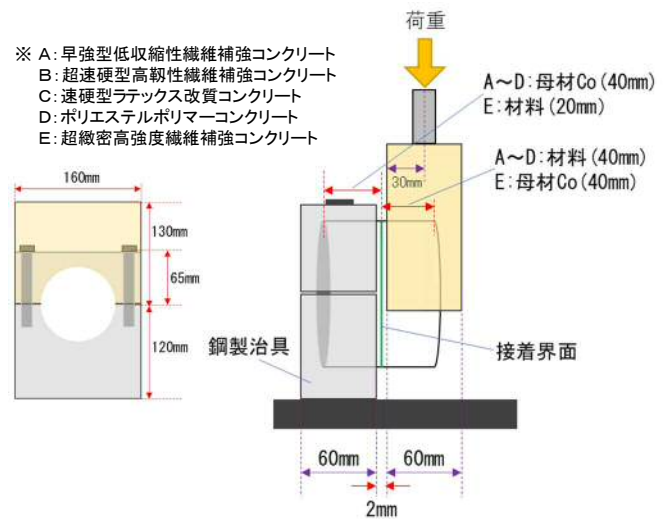


図-5 せん断試験用の治具

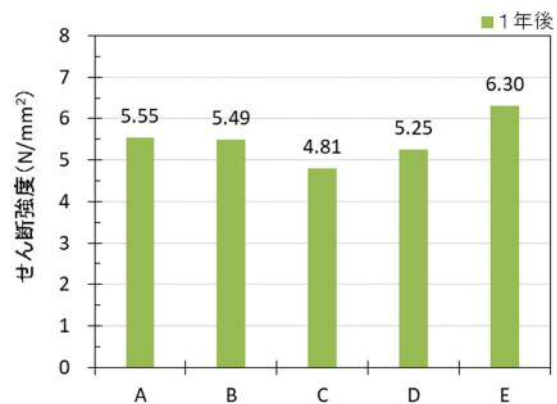


図-6 せん断強度の測定結果

4. まとめ

共通試験では、橋面コンクリート舗装技術を確認するため、公募により選定した材料について、材料特性を整理するとともに、施工性、強度発現性、走行性、床版を模擬したコンクリートとの一体性を評価した。その結果、気温 30℃を上回る環境下での施工であったにも関わらず、いずれの材料も概ね計画どおりの施工を行うことができ、施工時間と強度発現時間から実橋においても施工可能な材料であると判断した。また、既存の基準類や既往の知見を参考にすると、走行性および床版との一体性の観点からも、実橋において十分に適用できる技術レベルにあるものと考えられる。

今後としては、本検討における材料もしくは新たな材料について、実橋への適用性を引き続き検討するとともに、道路橋床版の長寿命化に寄与する効果や施工後の供用性なども確認していく必要がある。なお、本検討により得られた知見は、「道路橋床版の長寿命化を目的とした橋面コンクリート舗装ガイドライン 2020」¹¹⁾に反映されており、共通試験で実施した各材料の特性や施工の詳細についても紹介されている。

参考文献

- 1) 阿部忠, 伊藤清志, 児玉孝喜, 小林哲夫, 深川克彦: 接着剤塗布型橋面コンクリート舗装法における耐疲労性の評価に関する実験研究, 土木学会構造工学論文集 Vol.66A, pp650-661, 2020.
- 2) 郭度連, 森山守, 菊池徹, 李春鶴: ラテックス改質速硬コンクリートの基礎物性と耐久性能に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1939-1944, 2015.
- 3) 兵頭彦次, 市川裕規, 七尾舞, 梶尾聡, 長塩靖祐, 杉山彰徳: ラテックス改質速硬コンクリートを用いた道路橋床版の長寿命化の取組み, セメント・コンクリート, No.867, pp.8-14, 2019.

- 4) 常岡信希: 超緻密高強度繊維補強コンクリートによる床版補修工事について, 国土交通省近畿地方整備局研究発表会, イノベーション部門 I, 2018.
- 5) (一財) 災害科学研究所: 床版上面に J-THIFCOM を用いた大型床版輪荷重試験報告書, 2014.
- 6) 日本道路協会: 平成 31 年版 舗装調査・試験法便覧, 2019.3.
- 7) 日本道路協会: 舗装設計施工指針, 2006.2.
- 8) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株): 舗装施工管理要領, 2020.7.
- 9) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株): 構造物施工管理要領, 2020.7.
- 10) 阿部忠, 木田哲量, 徐銘謙, 澤野利章: 道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価式に関する研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.53A, 2007.3.
- 11) 土木学会: 鋼構造シリーズ 道路橋床版の長寿命化を目的とした橋面コンクリート舗装ガイドライン 2020, 2020.10.

(2020年7月17日 受付)