

防水性能を付与したプレキャスト床版「スリムトップ®」

佐々木 一成 川西 貴士

大場 誠道
(土木本部)

Development of Waterproof Precast Deck “Slim-Top”

Kazunari Sasaki Takashi Kawanishi
Narimichi Oba

Abstract

In the renewal work of old road bridges, precast decks are used to shorten the construction time and maintain quality. A waterproof layer at the top surface of the deck was applied to avoid concrete fatigue. However, waterproofing is one of the causes of construction time delay because waterproof work must be carried out under dry conditions. Therefore, a new precast deck "Slim Top" was developed to omit waterproof work at the site. It shows excellent waterproof performance and has ultra-high-strength fiber-reinforced concrete "Slim-Crete®" on the top of the deck. Experiments were conducted to confirm the waterproofing performance. It was confirmed that Slim Top has the waterproofness and durability required for 100 years of road track service.

概要

劣化した道路橋床版の取替工事では、工期短縮、品質向上の観点からプレキャスト床版が用いられており、現場施工の急速化、耐久性の向上が図られている。床版劣化の主要因は、床版コンクリートへの水の浸入であることから、一般的に現場で床版上面に防水工が施工される。しかし、防水工の施工は天候に左右され、天候不良による工程遅延のリスクがあった。また、更新される床版は設計供用期間が100年であるが、防水工は30年に1度の更新が必要であった。そこで、高強度で耐久性に優れた超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート®」を床版上面に配置し、あらかじめ防水性能を付与したプレキャスト床版「スリムトップ」を考案し、その力学的性能を確認するため、各種実験を行った。その結果、スリムトップは要素実験により100年間供用するために必要な防水性、一体性を有していること、輪荷重走行試験により疲労耐久性を有していることを確認した。

1. はじめに

老朽化した道路橋床版のリニューアルプロジェクトにおいて、工期短縮と更新した床版の長寿命化は重要な技術課題である。本稿では、大林組が開発した道路橋床版更新技術のうち、プレキャスト床版「スリムトップ」について紹介する。

道路橋床版の劣化の要因として、床版コンクリートのひび割れに浸入した水と繰返し作用する交通荷重によりコンクリートがすり減る土砂化や、凍結防止剤に含まれる塩化物イオンの侵入による鋼材腐食が挙げられる。劣化要因となる水や塩化物イオンの床版コンクリートへ侵入を防ぐため、床版取替工事ではコンクリート床版上面に防水工を現場で実施することが標準となっている。

防水工は雨天時には施工できないことから天候不良による工程遅延リスクがある。また、現在新しく更新される床版には100年の耐用年数が要求されているが、従来の防水工は30年に1度の更新が必要とされている。

そこで、耐久性が高い超高強度繊維補強コンクリート

「スリムクリート」²⁾を使用することで、現場での防水工の施工を不要とし、防水層として100年の耐久性を確保することができる床版を開発した。スリムクリートは高強度・高耐久であることからライフサイクルコストを低減

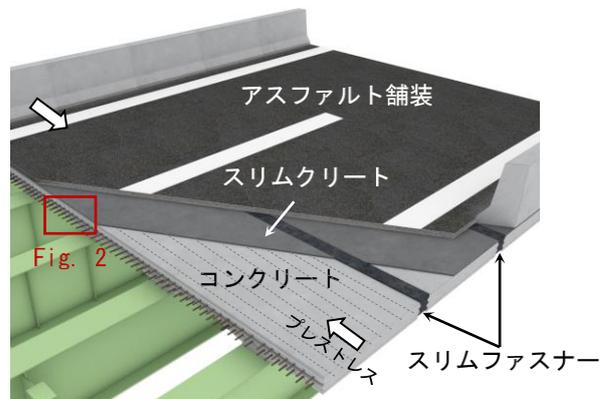


Fig. 1 スリムトップの構造
Outline of Slim-Top

することができる。経済性を高めるため断面を合理化し、表層のみスリムクリートを用いた複合構造による、あらかじめ防水性能を付与したプレキャスト床版「スリムトップ」(Fig. 1)を考案した。

本稿では、2章にスリムトップの構造と課題を示し、3章以降にスリムトップの性能を確認するために実施した検討内容を示す。

なお、本技術は東日本高速道路株式会社と大林組の共同研究により「UFC複合床版」として開発したものである。

2. スリムトップの構造

プレキャスト床版「スリムトップ」の構造を Fig. 1 に示す。一般的なプレキャスト PC 床版の上面20~50mm をスリムクリートに置き換えることにより防水機能を付与する。

スリムクリートは超高強度繊維補強コンクリート(Ultra high strength Fiber reinforced Concrete: 以下、UFC と表記)³⁾に分類される材料である。配合を Table 1 に示す。本材料はポルトランドセメント、ボゾラン材、無機粉体をあらかじめ混合したプレミックス材、粒径5mm 以下の骨材、特殊高性能減水剤、水および鋼繊維から構成され、標準養生により材齢28日で圧縮強度180N/mm²、引張強度8.8N/mm² (いずれも特性値)を満足する材料である²⁾。鋼繊維は直径0.16mm、長さ13mm、引張強度2700N/mm²で2vol.%混入している。

下部コンクリートは高速道路の床版取替工事で一般的に用いられるプレキャスト床版と同様に設計基準強度50N/mm²のコンクリートである。本床版は下部コンクリートを打込んだ後、硬化しないうちにスリムクリートを打ち重ねることにより一体化する構造である。橋軸直角方向にはプレテンションによるプレストレスを導入し、下部コンクリートだけでなく、上層スリムクリートにもプレストレスが導入される。

プレキャスト床版同士の接合にはスリムファスナー^{®4)}を適用し、上部の防水層となるスリムクリート同士は Fig. 2 に示すような鋸歯形状にして打ち継ぐ。スリムファスナーは間詰材にスリムクリートを使用したプレキャスト床版接合工法で、接合部の橋軸方向の長さは200mm 程度である。橋軸方向鉄筋は直筋で、フックや定着具を有していない。この鉄筋に引張応力が生じたときに橋軸直角方向には引張応力が作用する。この引張にスリムクリートの鋼繊維が抵抗するため橋軸直角方向の鉄筋は不要である。一般的なプレキャスト床版接合工法と比べて、現場での施工省力化により工程短縮できるとともに、耐久性にも優れた工法である。

本床版の技術的特徴は、コンクリートとスリムクリートを硬化していない状態で打ち重ねることにより一体化させていること、プレキャスト床版同士の接合部もスリムクリートを打ち継ぐことによりスリムクリート層で防

Table 1 スリムクリートの配合

単位量(kg/m ³)				鋼繊維(kg/m ³)
水	プレミックス材	骨材	高性能減水剤	
230	1830	330	32	157

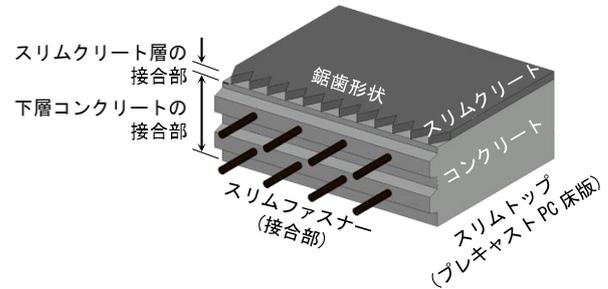


Fig. 2 スリムトップの接合部 Deck Connection of Slim-Top

水性能を確保させることが挙げられる。

硬化していない状態のコンクリートにスリムクリートを打ち重ねることにより、上層スリムクリートと下部コンクリートを同時に収縮させて収縮差を減じている。これによって、硬化したコンクリートにスリムクリートを打ち継ぐ場合よりも下部コンクリートの拘束によるスリムクリートの収縮ひび割れの発生を抑制している。しかし、スリムクリートとコンクリートの凝結や収縮特性が異なるため、少なからず両材料間の収縮差の拘束による影響があると考えられる。また、スリムクリート層は表面からの乾燥の影響を受けやすく、養生方法によっては目視できないような微細なひび割れ(以下、「マイクロクラック」と表記)が発生する可能性がある。

以上の特徴を踏まえ、3章では複合部材の防水層および接合部の防水性能、4章ではスリムクリート層の上面に直接舗設されるアスファルト舗装との一体性、下部コンクリートとスリムクリートとの一体性、接合部の一体性についてそれぞれ検証した。また、5章ではスリムトップの実施工を模擬した試験体によりマイクロクラックを抑制する養生方法について検討した。6章では供用期間100年の疲労耐久性が確保されていることを輪荷重走行試験により確認した。

3. スリムトップの防水性

3.1 概要

スリムクリートをはじめとするUFCは透水係数が極めて小さく、スリムクリートの透水係数は 6.8×10^{-20} m/sである²⁾。一方、プレキャスト床版同士の接合部に生じるスリムクリート同士の打継目や、マイクロクラックが生じた場合のスリムクリート層は、スリムクリート単体の防水性とは異なることから、防水性を検証することとした。

防水層に必要な性能を確認するための試験法は道路橋

床版防水便覧⁹⁾に規定されているものの、定量的な指標となる基準は規定されていない。そこで、防水層に必要とされる透水係数を設定するとともに、マイクロクラック部および打継目の透水係数を算出するため実験を行った。

3.2 スリムトップに必要とされる防水性能の設定

スリムトップに必要とされる防水性能として、供用期間中に床版に作用する水圧および作用時間を想定し、透水係数の上限値を設定した。

床版に水圧が作用する累計時間として、湿潤状態で走行車両が通過する時間を求めた。算出結果をTable 2に示す。

作用する軸数は2005年の東名高速道路日本平における軸重計データ⁶⁾とし、床版上面が湿潤状態になっている日数は気象データ⁷⁾から全国の年間降雨日数の平均である約120日を基に降雨翌日も滞水していると仮定して240日とした。

タイヤによる荷重は大型車両のタンデム軸重を想定して接地圧0.5MPa⁸⁾とし、Table 2に示す100年の供用期間中に湿潤状態で荷重が作用する時間の累計1353時間を用いて式(1)~(4)の関係から透水係数と防水層への水の浸透深さの関係について算出した。その計算結果をTable 3に示す。

$$q=ki \tag{1}$$

ここに、 q ：流速 (m/s)

k ：透水係数 (m/s)

i ：動水勾配

q および i は以下に置き換えることができる。

$$q=L/t \tag{2}$$

Table 2 供用期間中に車両の荷重が作用する時間の計算

Time when the Load of the Vehicle Acts			
項目	記号	単位	値
年間の軸数	A_y	台/年	8226000
供用期間中に作用する軸数	A_{100y} ($=A_y \times 100$)	台/100年	822600000
車両の走行速度	v	km/h	80
作用する荷重の長さ	L_T	mm	200
荷重が通過する時間	t_1 ($=L_T/v$)	秒	0.009
床版上面が湿潤状態と想定される日数	W_d	日	240
供用期間中に湿潤状態で荷重が作用する時間	t ($=A_{100y} \times t_1 \times W_d / 365$)	時間/100年	1353

Table 3 防水層に求められる透水係数の検討
Hydraulic Conductivity Requirement of Waterproof Layer

透水係数 k (m/s)	水の浸透深さ L (mm)
1.0×10^{-11}	49.3
1.0×10^{-12}	15.6
1.0×10^{-13}	4.9
1.0×10^{-14}	1.6
1.0×10^{-15}	0.5
1.0×10^{-16}	0.2

$$i=h/L \tag{3}$$

(1)~(3)より

$$L=\sqrt{kh\bar{t}} \tag{4}$$

ここに、 L ：水の浸透深さ ($\times 10^3$ mm)

t ：所要時間 (=1353 \times 3600)(秒)

h ：水頭差 (0.5MPa相当として $h=50$ m)

スリムクリート層の施工性から決まる最小厚は20mmである。よって設計供用期間中に水が浸透する深さが20mm未満となる透水係数がスリムクリート層に要求される。そこで余裕を見込んで供用期間中の浸透深さが4.9mmとなる透水係数である 1.0×10^{-13} m/s以下を要求性能とした。

3.3 スリムトップ防水層の防水性

スリムトップを模擬した試験体において透水試験を実施した。Fig. 3に示すマイクロクラックを発生させた試験体は、厚さ200mmのコンクリートに厚さ20mmのスリムクリートを打ち重ねたものである。下層に用いたコンクリートは実構造物を想定した設計基準強度50N/mm²の早強コンクリートである。養生方法は、湛水養生後に表面を乾燥状態とした(5章で詳述)。これにより、スリムクリート層にマイクロクラックを再現した。実施工で実施している水中養生よりもマイクロクラックが発生しやすい条件であり、実施工で発生するマイクロクラックと同等以上のひび割れ幅と考えられる。透水試験に用いる供試体

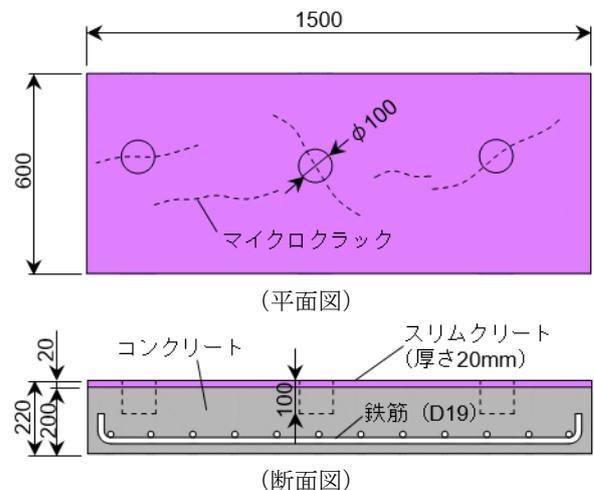


Fig. 3 マイクロクラックを発生させた試験体
Layered Concrete for Making Micro-Cracks

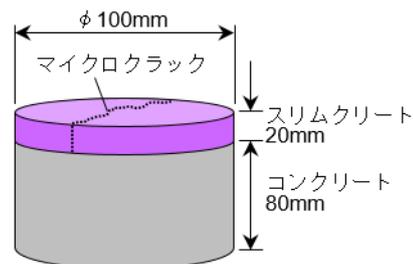


Fig. 4 透水試験を行った供試体
Specimen of Water Permeability Test

Table 4 スリムトップの透水試験結果

Results of Water Permeability Test					
No.	平均浸透 深さ D_m (mm)	拡散係数 β_0^2 (m^2/s)	透水係数 k (m/s)	最深部	
				浸透深さ (mm)	透水係数 (m/s)
1	2.61 2.61	2.13×10^{-9}	8.17×10^{-16}	11.3	1.78×10^{-14}
2	0.18 0.00	1.18×10^{-11}	4.53×10^{-16}	4.1	2.35×10^{-15}
3	浸透 なし	—	—	浸透 なし	—

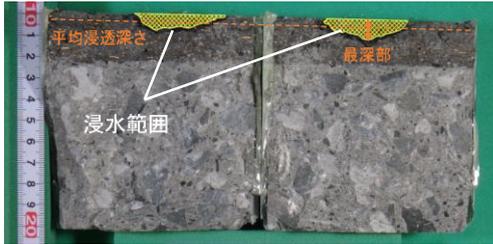


Photo 1 スリムトップの透水試験後の割裂面(No.1)
View of Crack Surface (No.1)

はマイクロクラックが発生した箇所からFig. 4に示すようなφ100×100mmの円柱を3体採取した。透水試験はインプット法により、水圧1MPa、加圧時間24時間で供試体に水を浸透させた。加圧終了後マイクロクラックに沿って供試体を割裂させて浸透深さを計測し、割裂面の浸透深さから拡散係数を算出して、その値を用いて透水係数を求めた⁹⁾。実験結果をTable 4に、割裂面の状況を Photo 1に示す。平均浸透深さは割裂した2面をそれぞれ計測した値である。いずれの供試体も下層のコンクリートへの浸水は見られなかった。試験によって得られた透水係数は最大で $1.78 \times 10^{-14} m/s$ であり、いずれも $1.0 \times 10^{-13} m/s$ 以下であり、要求性能を満足していた。

3.4 スリムトップ接合部の防水性

スリムトップ同士の接合部にはスリムクリートの鉛直方向打継目が生じる。スリムクリート同士を鉛直方向に打ち継いだ場合の透水係数を求めるため、Fig. 5に示す試験体からφ100×150mmの供試体を採取して透水試験を行った。スリムクリートの打ち込み方向はいずれも鉛直方向である。先打ち部は、打ち込み24時間後に脱型して打継面を高圧水で洗い流し、材齢28日経過後、打継面を乾燥させたのち、実施工時と同様にアクリルメタクリル系プライマーを塗布してから打継ぎを行った。

透水試験の方法は前項と同様である。ただし、前項と異なり、浸透深さを20mm以上に大きくすることができることから、透水係数の算出精度を高めるため、加圧時間は7日および14日とした。試験結果をTable 5に、割裂面の状況をPhoto 2に示す。試験で得られた透水係数は最大で $5.96 \times 10^{-14} m/s$ であり、前項と同様にいずれも $1.0 \times 10^{-13} m/s$ 以下となり、要求性能を満足することが確認できた。

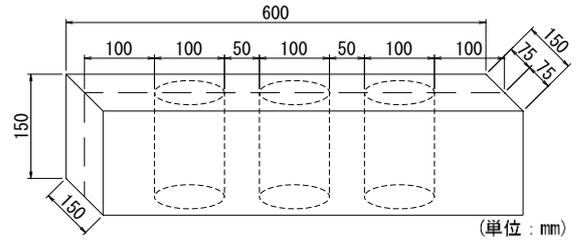


Fig. 5 鉛直打継面の透水試験に用いた試験体
Specimen having Vertical Construction Joint

Table 5 鉛直打継面の透水試験結果

Results of Water Permeability Test						
No.	加圧 時間 (日)	平均浸透 深さ D_m (mm)	拡散係数 β_0^2 (m^2/s)	透水係数 k (m/s)	最深部	
					浸透深さ (mm)	透水係数 (m/s)
1	7	16.55	3.23×10^{-8}	1.24×10^{-14}	22.4	2.31×10^{-14}
		16.30				
2		22.14	5.99×10^{-8}	2.30×10^{-14}	27.5	3.48×10^{-14}
		22.57				
3		11.87	1.68×10^{-8}	6.44×10^{-15}	19.9	6.44×10^{-15}
		11.81				
4	14	9.97	7.53×10^{-8}	2.89×10^{-15}	13.5	5.64×10^{-15}
		9.34				
5		16.17	2.30×10^{-8}	8.83×10^{-15}	29.8	2.75×10^{-14}
		17.59				
6		31.62	8.18×10^{-8}	3.14×10^{-14}	43.9	5.96×10^{-14}
		32.07				

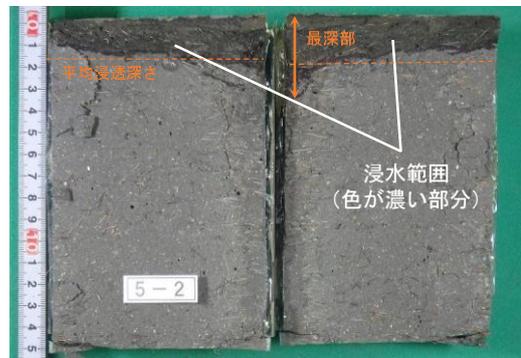


Photo 2 鉛直打継面の透水試験後の割裂面(No.5)
View of Crack Surface (No.5)

3.5 スリムトップ接合部の遮塩性

スリムクリート同士の鉛直打継面における塩化物イオンの浸透状況を把握するため、前項と同じ方法で製作した試験体を用いてJSCE-G572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」¹⁰⁾を参考に電子線マイクロアナライザー(EPMA)による分析を行った。供試体の寸法は100×100×400mmであり、これを3体製作した後、温度 $20 \pm 2^\circ C$ 、濃度10%の塩化物イオン水溶液中に6か月間浸漬した。浸漬終了後、打継面を含む供試体を切り出してEPMA法により塩化物イオン濃度を測定した。試験結果をFig. 6およびTable 6にそれぞれ示す。打継面における塩化物イオンの表面からの浸透深さ

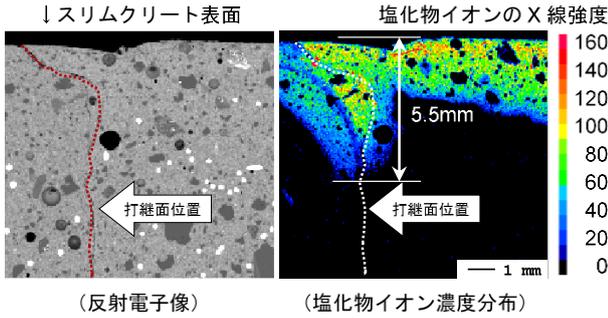


Fig. 6 EPMAによる分析結果(No.1)
Results of EPMA Analysis (No.1)

Table 6 塩化物イオンの浸透試験結果
Results of Chloride Ion Penetration Test

No.	塩化物イオンの表面からの浸透距離 (mm)	最深部の塩化物イオン濃度 (kg/m ³)
1	5.5	14.6
2	3.6	11.6
3	3.1	16.8

は最大で5.5mmであった。塩水が打継面に沿って浸透したと考えられる。打継面に沿った塩化物イオン濃度は表面と同程度であり、深くなるにつれて塩化物イオン濃度が高くなる傾向は見られなかった。また、主鉄筋のかぶり最低でも35mmなので浸透深さが5.5mmでも主鉄筋が錆びることはない。これらのことから防水性能が確保されていれば遮塩性は確保されると考えられる。

4. スリムトップの一体性

4.1 概要

スリムトップは異種材料の複合構造であることから一体性を確保することが重要である。スリムトップでは、以下が異種材料の接合となる。

- ・アスファルト舗装とスリムクリート層
- ・スリムクリート層と下層コンクリート

また、スリムトップは床版同士の接合部にもスリムクリートを適用することによって、床版全面をスリムクリートで覆う構造である。そのため、スリムクリートの打継ぎが必要となるので、スリムクリート同士の一体性を確保することも重要となる。

以下に、これらの一体性を確認した試験の概要について示す。なお、4.2～4.4節に示す試験に用いた供試体の下層コンクリートはいずれも設計基準強度50N/mm²の早強コンクリートである。

4.2 アスファルト舗装とスリムクリート層の一体性

アスファルト舗装とスリムクリート層の一体性について、高速道路会社の技術基準¹⁾で求められるアスファルト舗装とコンクリートに求める一体性の要求水準を満足することを確認した。検討の流れをFig. 7に示す。また、

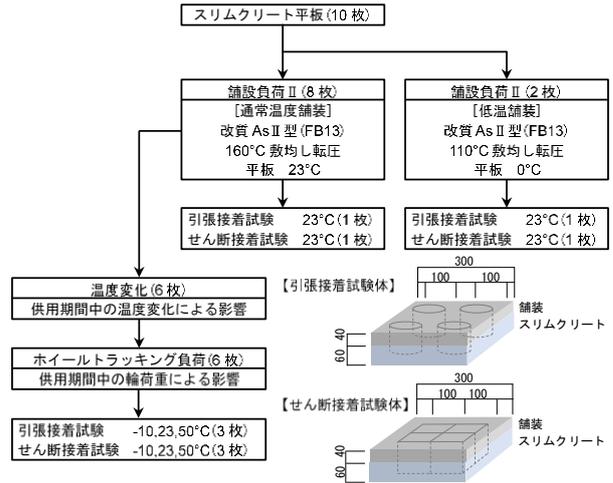


Fig. 7 アスファルト舗装とスリムクリート層の一体性の検討フロー

Flow of Adhesive Strength Test

Table 7 アスファルト舗装とスリムクリート層の一体性試験の基準値

Minimum Requirement of Adhesive Strength			
温度	-10°C	23°C	50°C
引張 (N/mm ²)	1.2	0.6	0.07
せん断 (N/mm ²)	0.8	0.15	0.01

基準値をTable 7に示す。

供試体は平面寸法300×300mmのスリムクリートの平板の上にアスファルトを舗装し、それぞれの負荷を与えたのちに、1水準あたり平板1枚から4体を切り出すことにより作製した。スリムクリートの平板表面は実構造物での施工を想定した金ゴテで平滑に仕上げを行った。スリムクリート平板の上面に実施工を模擬してタイヤ付着抑制型の乳剤を塗布し、橋梁レベリング層用アスファルト混合物FB13をローラーコンパクタにて締固めを行い付着させた。

温度などの試験条件をFig. 7に示す。温度変化の条件は23°C・16時間→-10°C・4時間→50°C・4時間を1サイクルとし、この1サイクルを1年の負荷とみなして舗装の耐用年数30年に相当する30サイクル実施した。ホイールトラッキング負荷は道路橋床版防水便覧に準拠した。

引張試験の概要をFig. 8に、試験結果をTable 8にそれぞれ示す。試験結果は1水準あたり4体実施した試験の平均値である。試験温度23°Cでは舗装材が破壊し、試験温度-10°Cおよび50°Cでは舗装と乳剤との界面で破壊した。いずれのケースにおいても基準値を満足する結果であった。

せん断試験の概要をFig. 9に、試験結果をTable 9に示す。試験結果は1水準あたり4体実施した試験の平均値である。試験温度23°Cおよび50°Cでは舗装と乳剤との界面で破壊、試験温度-10°Cでは乳剤とスリムクリートとの界面で破壊した。せん断強度についてもすべてのケースで基準値を満足する結果であった。

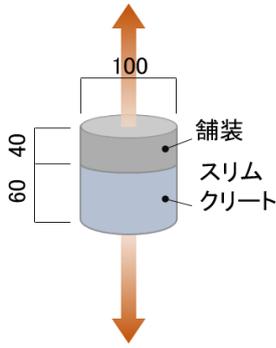


Fig. 8 引張試験
Tensile Test

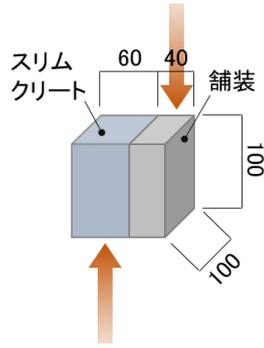


Fig. 9 セン断試験
Shear Test

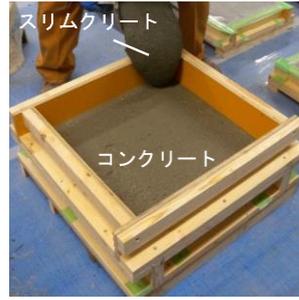


Photo 3 試験体作製状況
Slim-Crete Pouring of
Specimen

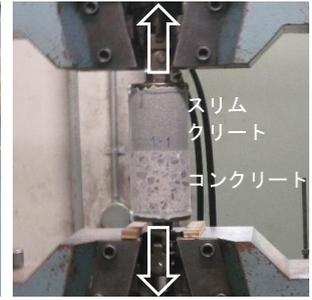


Photo 4 引張試験状況
Tensile Test

Table 8 引張試験結果
Results of Tensile Test

種別	負荷条件	温度 (°C)	引張強度 (N/mm ²)	基準値 (N/mm ²)	破断面の破壊状況
1	舗設負荷Ⅱ	23	1.24	0.6	舗装材破壊
2	舗設負荷Ⅳ		0.70		
3	舗設負荷Ⅱ	23	1.17	0.6	舗装材破壊
4	+温度変化	50	0.20	0.07	舗装と乳剤の界面破壊
5	+WT負荷	-10	1.81	1.2	舗装と乳剤の界面破壊

Table 9 セン断試験結果
Results of Shear Test

種別	負荷条件	温度 (°C)	せん断強度 (N/mm ²)	基準値 (N/mm ²)	破断面の破壊状況
1	舗設負荷Ⅱ	23	0.38	0.15	舗装と乳剤の界面破壊
2	舗設負荷Ⅳ		0.23		
3	舗設負荷Ⅱ	23	0.42	0.15	舗装と乳剤の界面破壊
4	+温度変化	50	0.03	0.01	舗装と乳剤の界面破壊
5	+WT負荷	-10	1.50	0.8	乳剤とスリムの界面破壊



Photo 5 一面せん断試験体
Specimen of Shear Test



4.3 スリムクリート層と下層コンクリートの一体性

4.3.1 引張接着性能 スリムクリートとコンクリートの水平打重ね部を設けた試験体を作製し、一軸引張試験により引張性能を確認した。試験体作製状況をPhoto 3に示す。打重ね部は実構造物での製作を想定して、下部コンクリートを打ち込んだ後、表面に凹凸を残すため木ゴテにより高さを調整する程度にならしてスリムクリートを打ち重ねた。試験体からφ100×200mmのコア供試体を採用し、両端に治具を接着剤で取り付けて引張力を作用させた。

引張試験の状況をPhoto 4に示す。試験の結果、5体の供試体すべてでコンクリート母材の破断となり、打継面は弱点とならないことが確認された。なお、平均引張強度は2.36N/mm²である。

4.3.2 セン断接着性能 打重ね部の簡易一面せん断試験によりせん断性能を確認した。試験体はPhoto 5に示すようにφ200×100mmのモールドにコンクリートを打ち込み、型枠を100mm嵩上げてスリムクリートを打ち重ねることにより作製した。試験機をFig. 10に、試験結果をFig. 11にそれぞれ示す。Fig. 11はせん断応力と垂直応力の

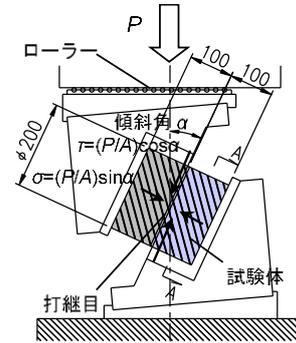


Fig. 10 一面せん断試験
Shear Test

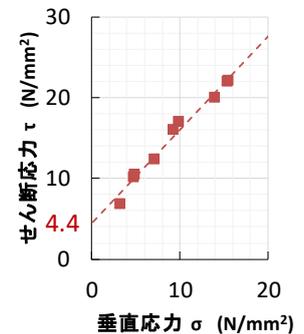


Fig. 11 セン断試験結果
Results of Shear Test

関係であり、Fig. 10中に示す各成分の応力である。Fig. 11から純せん断強度は4.4N/mm²であり、床版に作用する水平せん断応力に対して十分な強度を有していることを確認した。

4.3.3 梁試験体の曲げ荷荷による一体性 曲げ破壊型、せん断破壊型の試験体により、破壊時のスリムクリートとコンクリートとの一体性を確認した。

試験の概要図をFig. 12およびFig. 13に示す。試験体は実構造物を想定して同様の方法により作製し、梁の高さは床版厚を想定した220mm、スリムクリート層の厚さは20mmとした。せん断スパンはそれぞれ、曲げ破壊型は1000mm、せん断破壊型は500mmとした。

曲げ破壊型試験体の破壊状況をPhoto 6に示す。曲げ破壊型試験体では一般的なコンクリート梁と同様に引張鉄筋が降伏した後、最終的にスリムクリートが圧壊するこ

とにより荷重が低下した。荷重の増加にともなって、界面付近まで伸びた曲げひび割れが水平方向に進展したが、最大耐力に達するまでスリムクリート層がコンクリートから剥離するような現象は見られなかった。

せん断破壊型試験体の破壊状況をPhoto 7に示す。せん断破壊型試験体では、引張鉄筋降伏後、最終的に斜めひび割れがスリムクリート層を貫通し、荷重が低下した。せん断破壊型試験体においても曲げ破壊型試験体と同様に最大耐力に達するまで、スリムクリート層が剥離するような現象は見られなかった。

本節で述べた要素実験によって、下部コンクリートが硬化しないうちにスリムクリートを打ち重ねることにより一体性が確保できることが確認できた。

4.4 スリムトップ接合部の一体性

4.4.1 鉛直打継面の引張性能 スリムクリート同士の鉛直打継部を設けた試験体を作製し、一軸引張試験に

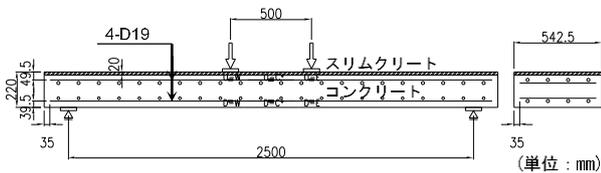


Fig. 12 曲げ破壊型試験の概要

Reinforcement of Bending Test (Bending Fracture Type)

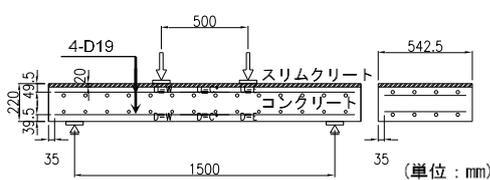


Fig. 13 せん断破壊型試験の概要

Reinforcement of Bending Test (Shear Fracture Type)



Photo 6 曲げ破壊型試験体の破壊状況

Cracks of the Bending Test (Bending Fracture Type)



Photo 7 せん断型試験体の破壊状況

Cracks of the Bending Test (Shear Fracture Type)

より打継面の引張性能を確認した。打継面の処理方法は前述した3.4節と同様である。

実験結果をTable 10に示す。引張強度の平均値は6.78N/mm²であった。スリムクリートのひび割れ発生強度8N/mm²を下回る結果であり、設計において鉛直打継部に作用する引張応力を打継ぎ引張強度よりも小さくするような配慮が必要であることがわかった。

4.4.2 接合部の一体性 前項の検討結果を踏まえて、接合部のスリムクリート同士の打継面が弱点とならないように鉛直打継面を鋸歯形状とした。この形状の工夫によって打継面の面積を増やすだけでなく、打継面に作用する引張応力を幾何的に低減できると考えた。

鋸歯形状による接合部の一体性を確認した試験の概要をFig. 14に示す。梁の高さは床版厚を想定した220mm、スリムクリート層の厚さは20mmとした。せん断スパンは1000mmである。スリムクリート同士の打継部が引張となるよう、スリムクリート層が下面になるように載荷した。

破壊後の状況をPhoto 8に示す。スリムクリート層を鋸

Table 10 スリムクリート同士の打継面の引張強度

	Results of Tensile Test				
	接着強度(N/mm ²)				
鉛直打継ぎ	1	2	3	4	平均
	6.88	6.58	7.24	6.42	6.78

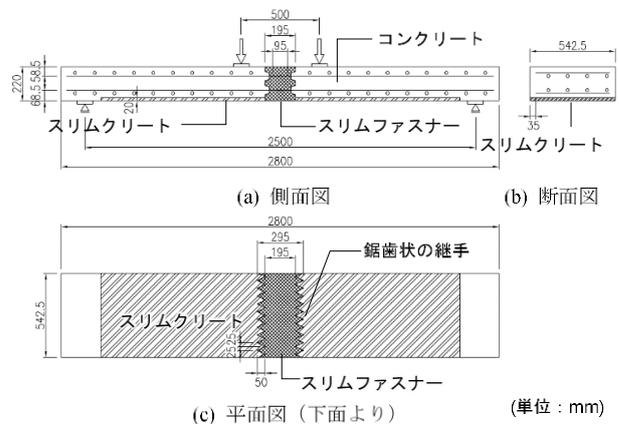


Fig. 14 スリムトップの接合部を設けた梁の曲げ試験

Shape of Bending Test Having Connection

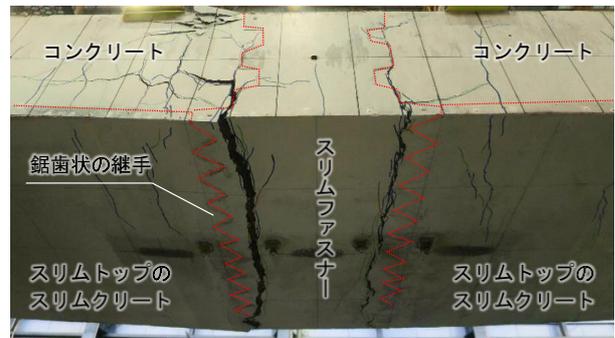


Photo 8 接合部の破壊状況

Cracks at Bottom Surface of the Bending Test

歯状に打ち継いだ部分でひび割れは拡大せず、スリムファスナー部で破壊した。スリムクリート同士の打継面の引張強度はひび割れ発生強度以下であったが、打継部を鋸歯状に工夫することでスリムクリート母材と同等以上の打継ぎ引張性能が確保できることがわかった。

5. 養生方法の検討

スリムトップは製造時の養生方法によりマイクロクラックが発生する可能性があることを2章で述べた。3.3節でマイクロクラックが発生しても防水性能を満足することは確認しているが、マイクロクラックは可能な限り抑制することが望ましい。そこで、スリムトップの実施工を模擬した試験体を用いて暴露試験を行い、マイクロクラックの発生状況を確認するとともに、最適な養生方法の検討を行った。

試験体の概要をFig. 15に示す。試験体の寸法は長さ1500mm、幅540mm、厚さ220mmである。スリムトップを模擬して表層にスリムクリート層を配置している。実験水準として、スリムクリート層の厚さや養生方法を変えて実験を行った。スリムクリート層の厚さは20、30、40および50mmの4種類であり、養生方法は乾燥による水分逸散を抑制するために、試験体表面の湛水養生と下部のコンクリートも含めた試験体全体的水中養生の2種類とした。水中養生については、打ち込み後、翌日まで湛水養生を行い、脱型後すみやかに水中養生を開始した。湛水養生および水中養生は材齢14日まで行い、養生後は気中に晒して、マイクロクラックの経過観察を行った。湛水養生を行ったスリムクリート層厚20、30、40mmの試験体については、材齢22日でマイクロクラックの発生が認められた。水中養生を行ったスリムクリート層厚20mmの試験体およびスリムクリート層50mmの湛水養生試験体については、材齢22日以降にマイクロクラックが発生した。発生したマイクロクラックの状況をPhoto 9に示す。いずれのマイクロクラックも乾いた状態では肉眼では確認できず、水で湿らせると肉眼で確認できる程度の極めて微細なものであった。経時による1m²あたりのマイクロクラックの延長の推移をFig. 16に示す。スリムクリート層の厚さが大きくなるほどマイクロクラックが少ない傾向となった。また、湛水養生よりも水中養生の方が、マイクロクラックが少ない傾向であった。材齢10ヵ月では、いずれのケースについても、表面を水で湿らせてもマイクロクラックを確認することはできなかった。材齢の経過とともにマイクロクラックが再水和やエフロレッセンスにより閉塞したと思われる。

6. 輪荷重走行試験による性能確認

6.1 概要

スリムトップの輪荷重に対する疲労性能を確認するため、輪荷重走行実験を実施した。供用期間100年に相当す

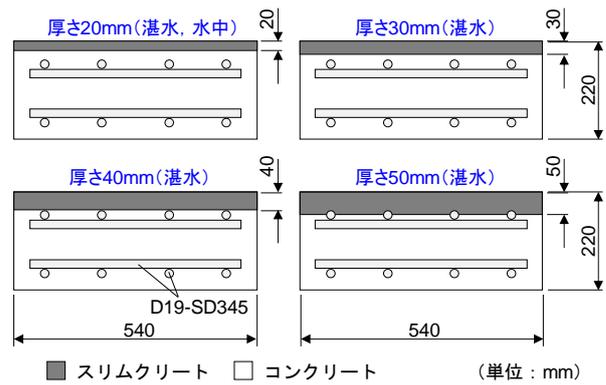


Fig. 15 養生方法の検討に用いた試験体 Specimens of Curing Test



Photo 9 発生したマイクロクラック Microcrack in Surface of Slim-Crete

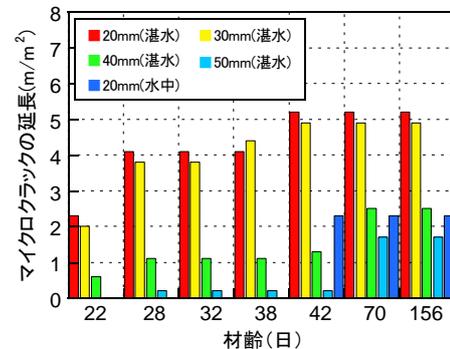


Fig. 16 マイクロクラック延長の推移 History of Microcrack Length

る載荷に加え、さらに水を張った状態で走行させた。

6.2 実験方法

6.2.1 試験体 試験体をFig. 17およびFig. 18に、使用した材料の諸元をTable 11およびTable 12に示す。配筋やプレストレス量は既往の実験⁶⁾を参考にした。試験体寸法は長さ4.5m、幅2.8m、厚さ0.22m（ハンチ部は0.27m）とし、上部20mmはスリムクリート、下部200mmはコンクリートを使用した。PC鋼棒によりポストテンションでプレストレスをコンクリートの応力で5N/mm²導入している。

下部のコンクリートを200mmの高さで打込んだ後、硬化しないうちにスリムクリートを打ち重ねて一体化させ

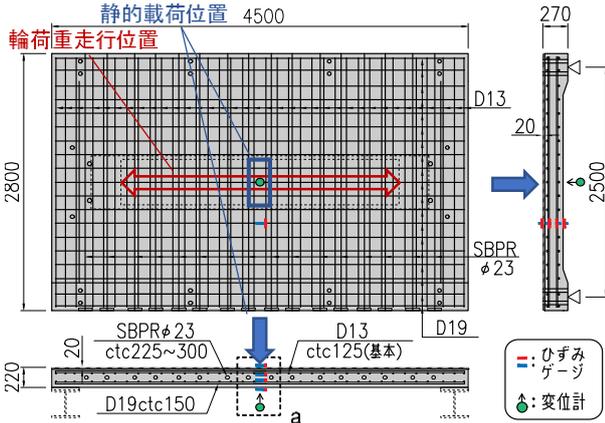


Fig. 17 輪荷重走行試験体概要

Shape and Reinforcement of Wheel Load Running Test

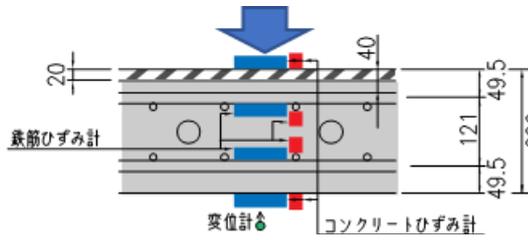


Fig. 18 a部詳細 (各ゲージ位置)

Strain Gauge Directions of Wheel Load Running Test

た。打重ね界面となる下部コンクリートの表面は実構造物と同様に木ゴテで高さを整える程度に均して凹凸が残る状態とした。スリムクリート層の表面は金ゴテで仕上げ、乾燥しないよう養生フィルムおよび湛水により湿潤状態とし、常温で養生した。材齢14日でPC鋼棒によりポストテンションでプレストレスを導入している。

6.2.2 荷重方法および計測方法 荷重荷重と走行回数との関係をFig. 19に示す。輪荷重走行試験機の車輪は幅500mmの鉄輪であり、幅500mmの軌道3.0mの区間を15rpmで車輪を往復させた。輪荷重は250kNとし、乾燥状態で10万回、その後、床版表面に水を張った状態で10万回、合計20万回走行させた。なお、乾燥状態で輪荷重250kN×10万回の負荷はPC床版の供用年数100年に相当する⁶⁾。試験終了後に床版を切断した際、下部コンクリートへの浸水が確認できるように、水張り荷重には水性ペンキで着色した水を使用した。支点は単純支持でスパンは2500mmとした。床版のたわみ、鉄筋ひずみをFig. 17 (詳細をFig. 18) に示す位置で計測した。計測時は輪荷重をFig. 17に示す位置で停止させた。計測時期をFig. 19に示す。

6.3 実験結果

実験結果をFig. 20, 21に示す。ここで、総たわみとは各ステップにおける静的荷重時の計測値、残留たわみは除荷後の計測値、活荷重たわみは総たわみから残留たわみを減じた値である。なお、図中には比較のため同様の寸法、配筋で普通コンクリートにより作製したPC床版(以

Table 11 使用材料 (コンクリート, スリムクリート)

		Material Properties of Concretes			
		圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
コンクリート	開始時	74.8	4.79	—	3.83×10 ⁴
	終了時	73.0	3.91	—	3.83×10 ⁴
スリムクリート	開始時	196	9.63*	38.2	4.21×10 ⁴
	終了時	191	—	—	—

※ 曲げひび割れ発生強度から換算式³⁾により算出した値

Table 12 使用材料 (鉄筋)

		Material Properties of Rebar			
		降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (×10 ⁻⁶)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
D13		365	1985	535	1.96×10 ⁵
D19		393	2376	615	1.98×10 ⁵

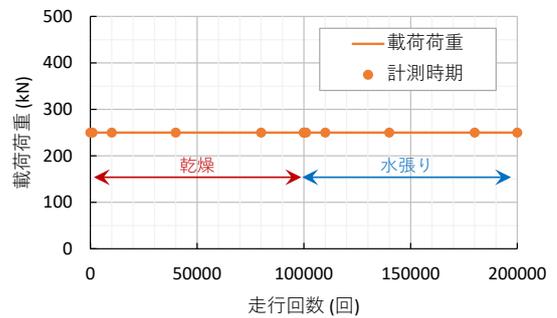


Fig. 19 荷重ステップおよび計測時期
Loading Program of Wheel Loading Test

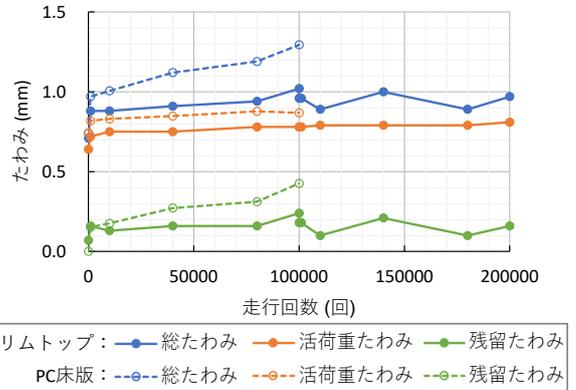
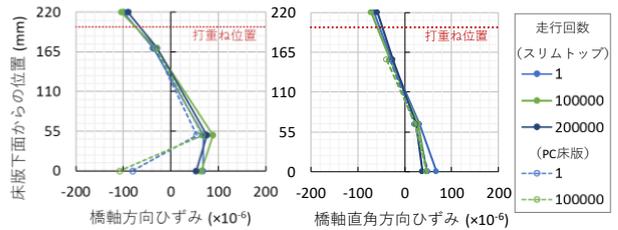


Fig. 20 たわみ-走行回数関係
Deflection-Cycle Relationship



(a) 橋軸方向 (b) 橋軸直角方向
Fig. 21 断面ひずみ分布
Strain Distribution

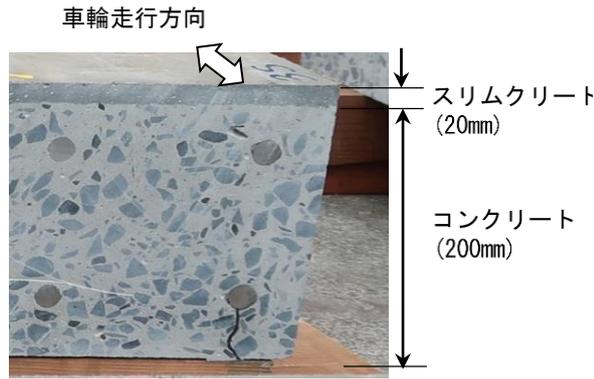


Photo 10 試験終了後の床版断面（床版中央部）
Status of Slab Cross Section after the Test

下、PC床版と表記)による既往の実験結果⁹⁾を走行回数10万回まで破線であわせて記載している。

Fig. 20より、スリムトップはPC床版と比較して活荷重たわみ、残留たわみとも小さい傾向が見られた。スリムトップは10万回以降も残留たわみおよび活荷重たわみに増加傾向は見られなかった。

Fig. 21より、断面のひずみは下側鉄筋からスリムクリート層上面にかけて線形に分布している。このことから20万回終了時においても上部スリムクリート層と下部コンクリートとの一体性は確保されているといえる。

試験終了後に切断した床版の断面をPhoto 10に示す。水張りに使用した着色水による下部コンクリートへの着色は見られず、浸水はなかったと考えられる。また、スリムクリート層とコンクリートの界面にはひび割れなど見られず、一体性を確保していることが切断面の観察からも確認された。

なお、試験体作製時、スリムクリート表面にはマイクロクラックが発生していた。輪荷重走行試験終了後に6か所をコア抜きしてインプット法による透水試験を実施した。1MPa、48時間で加圧したが、下部コンクリートへの浸水はなく、拡散係数、透水係数を算出したところ、最も大きいところでそれぞれ $1.6 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 、 $6.2 \times 10^{-14} \text{m/s}$ であった。前述のとおり、スリムトップは100年の供用期間中、防水性能を確保できる性能として透水係数 $1.0 \times 10^{-13} \text{m/s}$ 以下を想定しており、供用期間100年に相当する載荷後もこれを満足していることが確認された。

7. まとめ

本稿ではスリムトップの開発にあたり、防水層であるスリムクリートに対して実施した防水性能確認実験、複合構造の一体性を確認するために行った各種実験、スリムクリート表面のマイクロクラックの発生を抑制するために実施した養生方法の検討、100年の疲労耐久性など総合的に確認するために実施した輪荷重走行試験について、それぞれの概要を紹介した。これらの検討の結果、以下のことが確認できた。

- 1) 床版の防水性能を評価する指標として透水係数を用い、その要求水準として $1.0 \times 10^{-13} \text{m/s}$ 以下であることと定めた。スリムトップはこの要求水準に対し十分な防水性能を有している。
- 2) スリムクリートとコンクリートを打ち重ねることにより、床版として必要な引張接着性能、せん断接着性能が十分に確保される。
- 3) スリムクリート同士の鉛直打ち継ぎを行っても、打継面を所定の方法で処理することによって、十分な防水性能を有している。また、鋸歯形状とすることで、所定の引張性能を満足する。
- 4) スリムクリートと舗装の一体性について、コンクリートと舗装の一体性を確認する際と同等以上の性能を有している。
- 5) スリムトップ製作時、脱型後から水中養生を行うことでマイクロクラックを低減することができる。
- 6) スリムトップは供用期間100年に相当する輪荷重に対して十分な疲労耐久性を有している。

なお、本工法は東北自動車道宮城白石川橋ほかで実施工を行っている。今後、実施工によって得られた知見をフィードバックし、更なる改良を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 川西貴士ほか：夜間1車線規制下での床版取替工法「DAYFREE®」におけるスリムクリート圧送による合理化施工技術、大林組技術研究所報、No. 85, 2021
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書、技術推進ライブラリー、No. 10, 2012
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）、コンクリートライブラリー、第113号、2004
- 4) 佐々木一成ほか：高耐久・短工期を実現するプレキャスト道路橋床版接合法「スリムファスナー®」、大林組技術研究所報、No. 82, 2018
- 5) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、2007.3
- 6) 後藤俊吾、長谷俊彦、本間淳史、平野勝彦：PC床版の疲労耐久性評価方法の提案、土木学会構造工学論文集、Vol. 66A, pp. 762-773, 2020.3
- 7) 総務省統計局：統計でみる都道府県のすがた 2021, pp. 14-15, 2021.2
- 8) 東日本・中日本・西日本高速道路：舗装施工管理要領、2020.7
- 9) 村田二郎：コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計、技報堂出版、2002
- 10) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準および関連規準, pp. 402-406, 2018
- 11) 東日本・中日本・西日本高速道路：設計要領第一集、2020.7