

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究状況報告書（1年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属	役職
	岩城 一郎(いわきいちろう)		日本大学	教授
②研究 テーマ	名称	データ同化をベースとした高耐久フライアッシュコンクリート舗装についての技術研究開発		
	政策テーマ	[主テーマ] (2)持続可能なインフラメンテナンス	公募 タイプ	タイプI, ハード分野
		[副テーマ](4)経済の好循環を支える基盤整備		
③研究経費（単位：万円） ※R4は受託額、R5以降は計画額を記入。端数切捨。	令和4年度	令和5年度	令和6年度	総合計
	5,000万円	4,000万円	2,000万円	11,000万円
④研究者氏名	(研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名	所属・役職			
前川宏一	横浜国立大学・教授			
高橋佑弥	東京大学・准教授			
小松怜史	横浜国立大学・准教授			
山野井悠翔	電力中央研究所・主任研究員			
前島拓	日本大学・専任講師			
佐藤良一	広島大学・名誉教授			

**⑤研究の目的・目標**（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）

申請者らはこれまでに、実物大モデルによる実験と解析を駆使（データ同化）し、凍結防止剤散布下における道路橋コンクリート床版の耐久性向上を図るためには、フライアッシュを用いることが有効であることを突き止め、三陸沿岸道路をはじめとする復興道路・復興支援道路等を実装してきた。本技術研究開発では、今後アスファルト舗装からの適切な転換が期待されるコンクリート舗装に対し、設計供用期間100年の実現を目指し、データ同化手法をベースに高耐久フライアッシュコンクリート舗装の開発と実装を行うものである。当該年度は、日本大学工学部構内に各種混和材を併用した連続鉄筋コンクリート舗装を施工し、コンクリートおよび鉄筋の膨張収縮挙動を精緻に捉え、これを入力値としたマルチスケール解析モデルを作成し、コンクリート舗装の力学挙動を評価可能なモデルを構築した。また、普通コンクリート舗装についても耐疲労性を評価可能なモデルの作成を進め、輪荷重走行実験の事前解析を行うとともに、実験結果との比較を実施する。

## ⑥これまでの研究経過

### 1. フライアッシュコンクリート舗装の配合選定と要素レベルによる耐久性評価(FSからの継続)

表-1に検討配合を示す。本検討では、水セメント比およびフライアッシュの置換方法をパラメータとした供試体を作製し、強度発現性、凍結融解抵抗性、塩分浸透抵抗性、ASR抑制、すり減り抵抗性について評価することで、コンクリート舗装材料としての適切な配合について検討した。その結果、フライアッシュを混和したコンクリート配合は、従来のコンクリート舗装に用いられる配合と比して凍結防止剤散布環境下で想定される各種材料劣化に対する耐久性および舗装の表層機能として要求されるすり減り抵抗性が向上することを明らかとし、フライアッシュコンクリート舗装としての適用性を確認した。また、フライアッシュの新たな置換方法として、フライアッシュをセメントの質量に対して外割(細骨材置換)で15%、内割(セメント置換)で5%混和した配合においても十分な強度発現性と耐久性を有することを確認した。そこで、次章での実物大フライアッシュコンクリート舗装の実装試験の配合は、FAをセメントの質量に対し外割り15%、内割り5%で置換した配合を最適配合とした。

表-1 配合

ID	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤(C×%)	
				W	C	FA	S	G	AE減水剤	AE剤
40N	40.0	40.0	40	160	400	—	706	1079	0.4	0.005
40FA20O		33.3				80	664	1014	1.0	0.035
40FA15O5I	42.1	34.8			380	—	670	1025	1.0	0.025
45N	45.0	45.0			356	—	721	1102	0.4	0.004
45FA20O		37.5				71	683	1044	0.6	0.030
45FA15O5I	47.3	39.1			338	—	689	1053	0.6	0.020

※IDの表記について  
 N:普通コンクリート  
 FA:フライアッシュコンクリート  
 40, 45:水セメント比  
 ○○:外割(細骨材置換)と置換率  
 ○○I:内割(セメント置換)と置換率

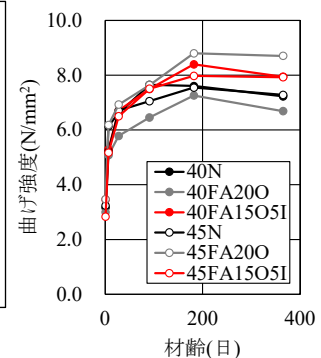


図-1 曲げ強度試験

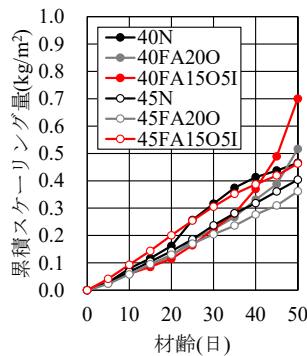


図-2 凍結融解試験

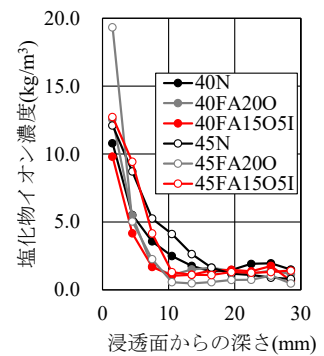


図-3 塩分浸透試験

### 2. フライアッシュコンクリート舗装の施工性および力学挙動評価

#### 工性および力学挙動評価

前章の結果を踏まえ、日本大学工学部構内の駐車場において実物大の連続鉄筋コンクリート舗装(CRCP)を実装し、その施工性、表層品質、および膨張収縮挙動によるひび割れリスクを評価することでフライアッシュコンクリート舗装の施工性および耐久性について実験的に検討した。

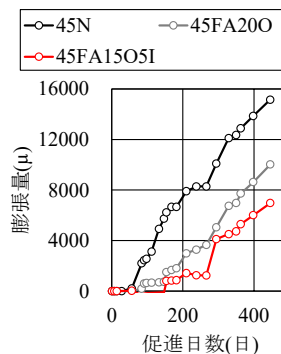


図-4 ASR 試験

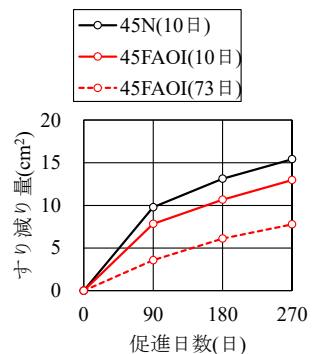


図-5 ラベリング試験



(1) コンクリートの打設



(2) 平坦仕上げ



(3) 散水養生

写真-1 施工風景

## 2.1 CRCPの概要

コンクリートの配合(表-2)は前章で示したフライアッシュの最適配合(FA)に加え、一般に用いられている普通コンクリート(N)配合および高炉セメントB種を用いた配合(BB)を比較として加えた。なお、FAとBBではひび割れ対策として膨張材を20kg/m<sup>3</sup>添加した。図-6, 7にコンクリート舗装版の概要と配筋図を示す。コンクリート舗装版は40×10.5×0.25mのCRCPとし、コンクリート舗装版の施工はスリップフォームペーバを用いたセットフォーム工法(写真-1)で行った。なお、同配合のコンクリートで供試体を採取し、ブリーディング試験(図-8)、凝結時間試験(図-9)を行い、フレッシュ性状を評価した。その結果、Nに対してFAはブリーディングが低減し、凝結時間が短縮される結果であった。一方、BBはブリーディングが増大し、凝結時間が遅延するなど差異が生じたものの、本施工においてはいずれの配合も施工性に問題なく、フライアッシュコンクリートとしてもスリップフォームペーバで十分に施工可能であることを確認した。

## 2.2 強度発現と表層品質および耐久性

図-10に曲げ強度試験結果を示す。FAは若干強度が低いものの、材齢28日で設計基準曲げ強度4.4N/mm<sup>2</sup>を全条件で満足することを確認した。また、透気試験(図-11)では、バラつきがあるものの、概ね優~良に

表-2 実施工配合

ID	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )						混和剤(B×%)	
				W	C	FA	Ex	S	G	AE減水剤	AE剤
N	40.1	40.1	34.3	162	404	—	—	602	1193	1.05	0.025
FA	42.2	34.9			384	81	—	570	1129	1.00	0.015
BB	40.1	40.1			404	—	—	592	1173	1.05	0.025

※N:普通コンクリート, FA:フライアッシュコンクリート, BB:高炉スラグコンクリート

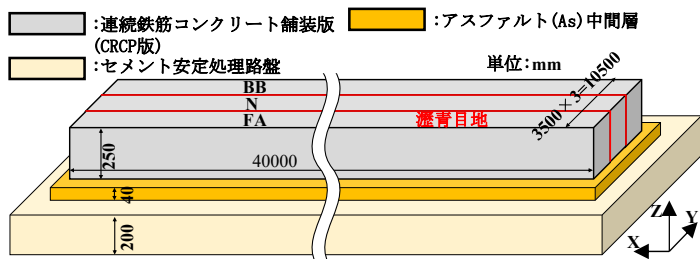


図-6 舗装概要

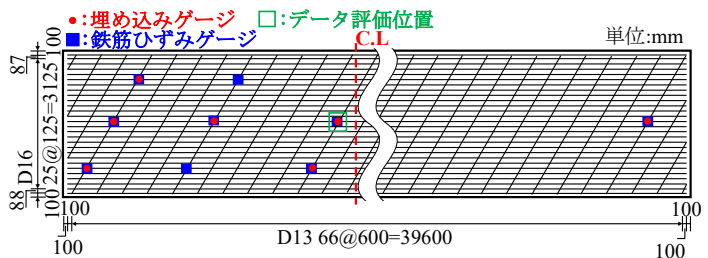


図-7 配筋図

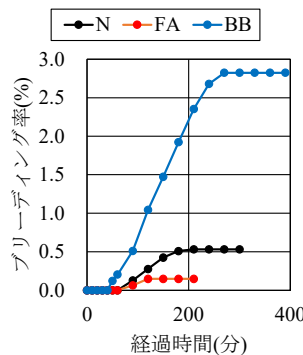


図-8 ブリーディング試験

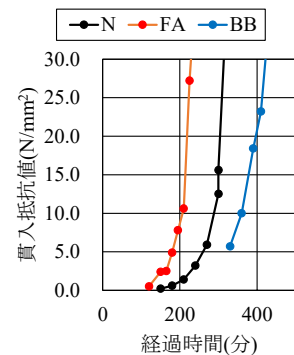


図-9 凝結時間試験

プロットされており、良好な表層品質が得られる結果であった。採取したテストピースによる塩分環境下を想定した凍結融解試験(図-12)では、BBのみスケーリングが増大する傾向であるが、これはBBの気泡間隔係数(図-13)が $350\mu\text{m}$ と大きいため、耐凍害性が低下したものと考えられ、BBの配合については再検討する必要がある。FAにおいてはNと同程度の結果が得られており、フライアッシュコンクリートとしても凍結融解抵抗性を確保し得ることを確認した。

### 2.3 コンクリート舗装版の膨張収縮挙動

CRCPのひび割れ発生リスクを評価するため、コンクリートと鉄筋のひずみ挙動について検討した。図-14に各種ひずみの推移を示す。なお、本稿では代表値として図-7の緑枠で示した舗装版中央位置のデータを示している。Nでは始発直後から全方向(X, Y, Z)でひずみが収縮する傾向を示したが、膨張材を混和したFAとBBではコンクリート

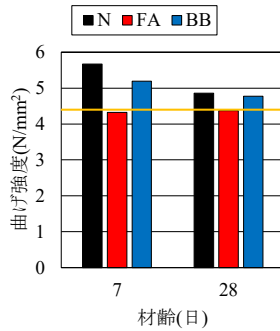


図-10 曲げ強度(現場養生)

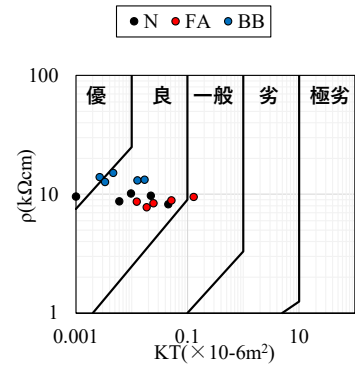


図-11 透気試験

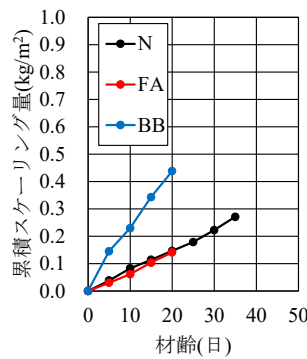


図-12 凍結融解試験

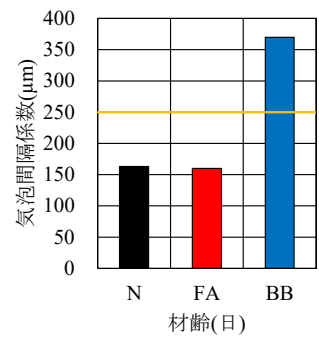


図-13 気泡間隔試験

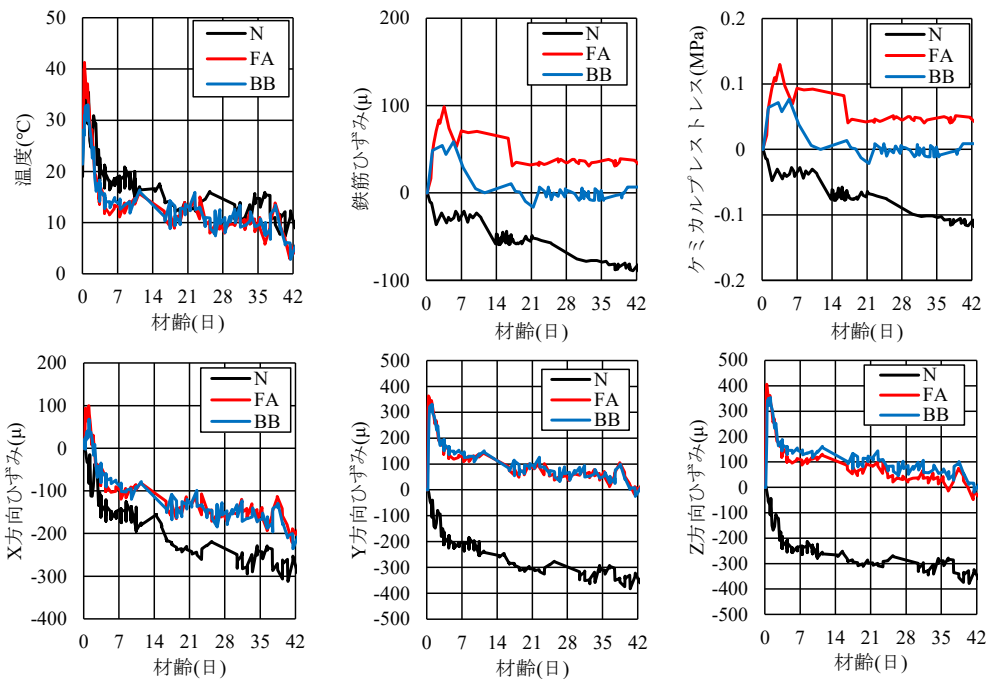


図-14 CRCP版内温度、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみおよびケミカルプレストレスの推移

が膨張する傾向であり、特に鉄筋による拘束がほとんどないY方向、Z方向ではその傾向が顕著であった。また、膨張材による膨張ひずみが鉄筋により拘束されたことによりケミカルプレストレスが発生し、相乗的にひび割れ抑制効果が得られていると考えられ、特にFA、BBの収縮ひずみは材齢42日現在においてもNと比して明らかに小さいことからひび割れリスクを低減し得るものと考えられる。なお、実装した舗装版にはひび割れの発生はなかったものの、これは40mという短いスパンであったためと考えられ、今後は本実験データを入力値とした各種解析を行うことで本配合のひび割れリスクを評価する予定である。

### 3. フライアッシュコンクリート舗装の耐久性評価に関する解析的検討

#### 3.1 汎用性ソフトによる解析

ここでは、汎用性のある3次元有限要素解析ソフト(JCMAC3-U)を用いて、実施工したCRCPを再現(図-15)し、コンクリート舗装版のひび割れリスクを解析的に検討した。なお、舗装の対称性を考慮し、解析領域は各工区の1/4としている。

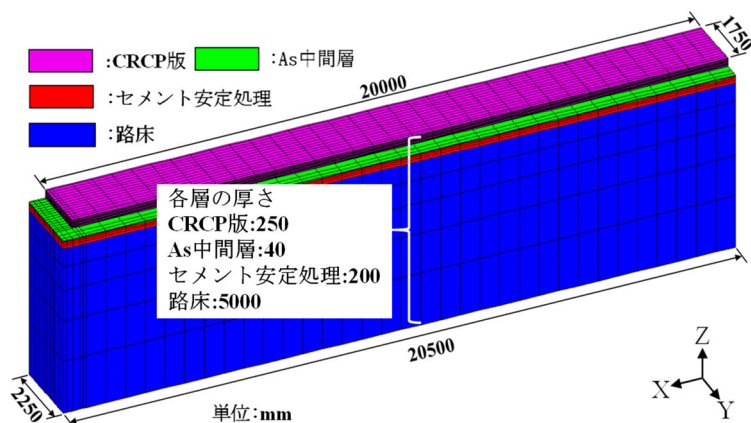


図-15 解析モデル

図-16より、温度解析については実測値と解析値の大きな乖離が見られず、本解析モデルにより舗装版内の温度を十分な精度で解析可能である。また、応力解析では、膨張材を混和した配合においても縦断(X)方向のひずみを一定の精度で解析可能であり、CRCPにおける初期ひび割れの発生リスクの高い横断(Y)方向のひび割れリスクを評価し得ることを示した。一方、横断(Y)方向および厚さ(Z)方向については、膨張材の混和による初期膨張を過小評価する傾向であるが、これはアスファルト中間層とCRCP版の境界条件を完全接着としていることが影響しているものと考えられ、境界条件を含めて解析モデルを改良する必要がある。

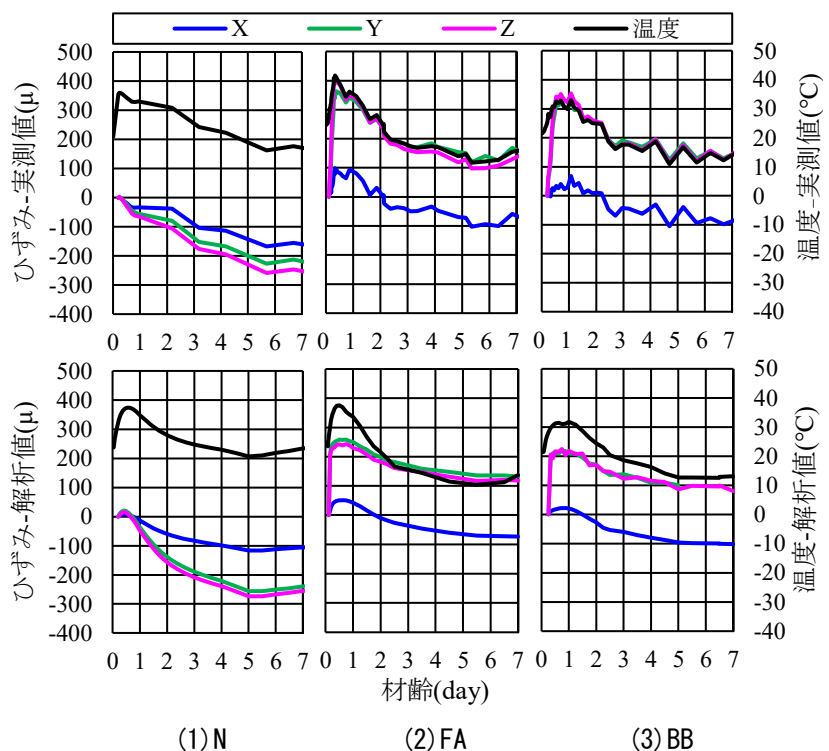


図-16 解析値と実測値の比較

解析値をもとに材齢28日時点での舗装の縦断(X)方向に発生した応力および横断(Y)方向のひび割れリスクを評価した。その結果, N では初期材齢から舗装版内に引張応力が発生したのに対し, 膨張材を混和した FA と BB では膨張応力が発生する結果であり, ひび割れ指数も FA と BB は N より極めて高く, フライアッシュコンクリートにおいては膨張材を併用することでひび割れリスクを低減し得る可能性が示された。

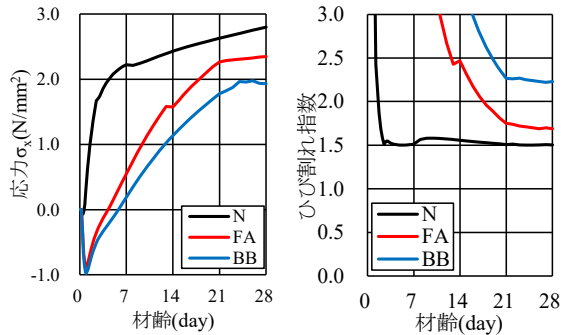


図-17 X方向に発生した応力とY方向のひび割れ指数

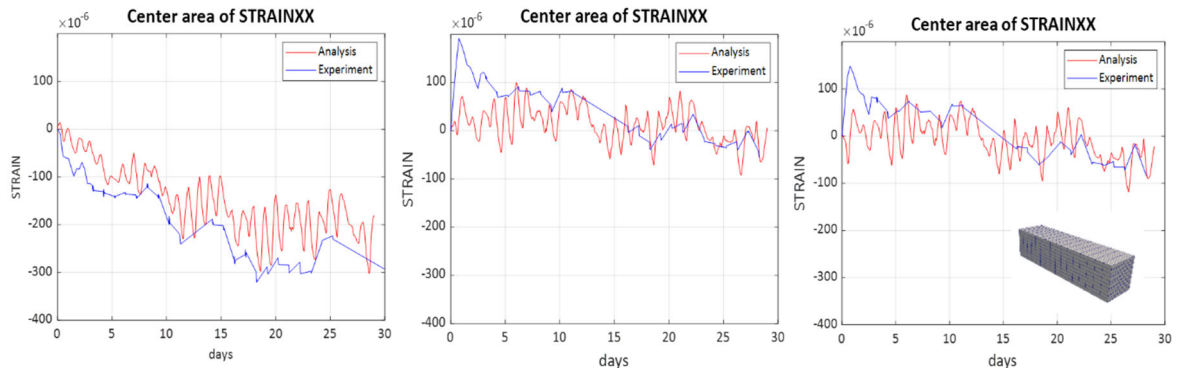
表-3 材齢28日におけるY方向のひび割れ発生確率

ID	ひび割れ発生確率(%)
N	15
FA	8
BB	0

### 3.2 材料-構造応答連成モデルによる解析

ここでは, 膨張材の反応が考慮可能な材料-構造応答連成解析システムを用いて, 複

数の配合で作製された角柱試験体ならびに実規模 CRCP の解析を実施した。試験体と同じコンクリート配合ならびに温湿度条件を入力し, 適切な膨張材量を設定することで, 20-20-80cm の無筋角柱試験体内部の温度変化, ならびに体積変化挙動(図-18)を良好に再現することができることが示された。その結果を踏まえて, 実規模 CRCP 試験体についても 1/4 モデルを用いた解析を実施し(図-19), 実験で計測された三方向のひずみ挙動を解析により再現できることを示した(図-20)。



(a) 普通セメント

(b)高炉セメント+膨張材

(c)フライアッシュ混和+膨張材

図-18 無筋角柱供試体の退席変化挙動解析結果

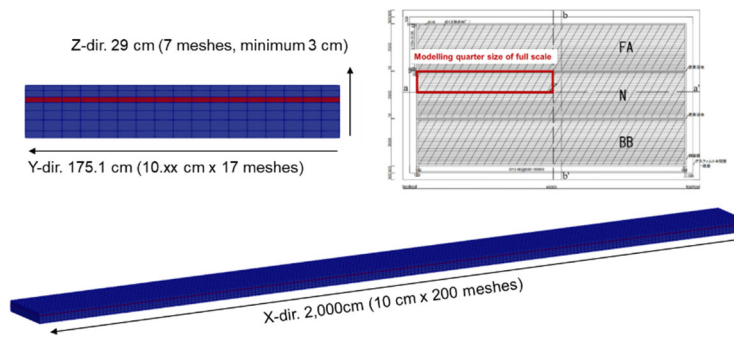


図-19 実規模CRCP試験体

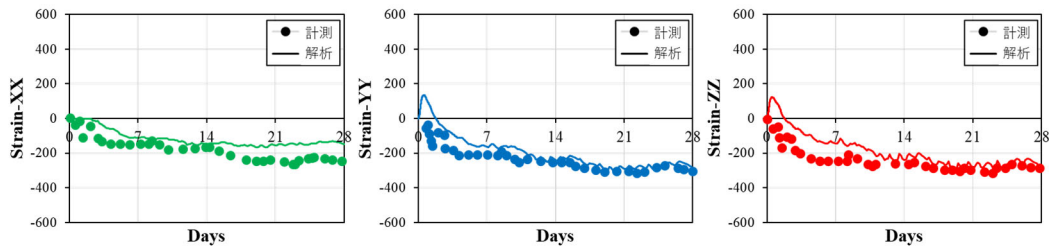


図-20 普通セメント配合試験体の体積変化

ひずみ挙動の検証がされた実規模 CRCP 試験体の解析を用いて、異なる配合の温度ひび割れリスクの比較を行った。アスファルト層下部の変形拘束が厳しい場合には材齢初期 1 日経過頃に CRCP 上面に温度応力によるひび割れが生じる結果となったが、フライアッシュを混和し膨張材を用いた配合では、生じる表面ひずみが小さく、温度ひび割れのリスクが低減されることが示された(図-21)。アスファルト基層による変形拘束の強さや、外部温度条件(夏季 or 冬季)によって、CRCP 上面で生じるひずみ分布が異なり、温度ひび割れリスクが変化することを定量的に明らかにした。

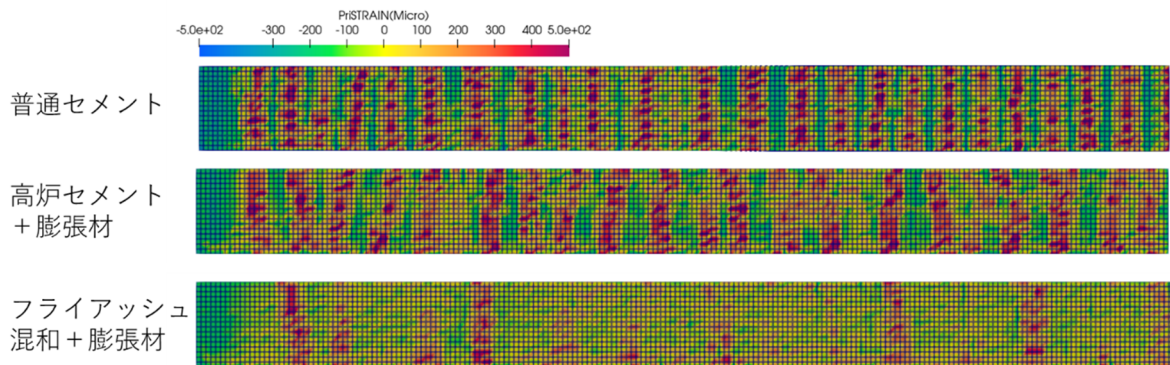


図-21 材齢 28 日時点の各配合の CRCP 上面ひずみ分布解析結果

#### 4. 普通コンクリート舗装目地部の耐疲労性評価に関する検討

##### 4.1 事前解析

本研究で改造を進めている輪荷重走行試験装置を活用した、普通コンクリート舗装目地部の損傷評価実験のための事前検討として、数値解析(3次元非線形有限要素解析コード:COM3)を用いて試験体の条件設定(舗装厚,目地条件)について検討を行った(図-22)。解析結果から、コンクリート舗装版の厚さを確保しつつ変状が生じうる条件として、実験での基準版厚が 200mm と設定された(図-23)。また、コンクリート舗装版の支持条件が一樣である場合には舗装版全体でたわむモードが優勢となり、目地部でのせん断損傷が大きくなる可能性が示唆された。そのため、版厚や目地材に加えて、路床・路盤材の支持力低下を招く水の影響等を実験的に検証するべきであると判断された。



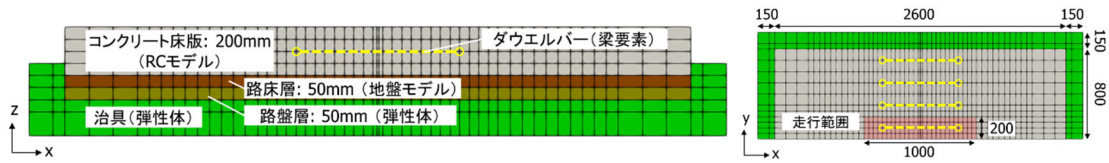


図-22 検討に用いた数値解析モデル化の例（側面図）

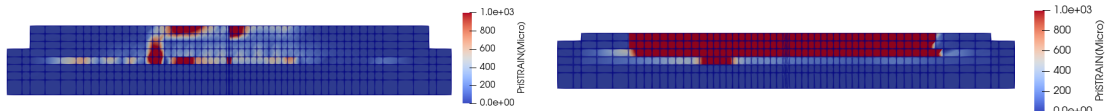


図-23 解析結果の例@試験開始約4日後（左図：舗装厚200mm、右図：舗装厚100mm）

#### 4.2 普通コンクリート舗装の輪荷重走行試験(途中経過)

図-24 に輪荷重走行試験装置の図面を示す。本検討では、日本大学工学部所有の輪荷重走行試験装置を普通コンクリート舗装の疲労試験用に改造し、図-25 に示す普通コンクリート舗装を模したコンクリート版供試体を用いて普通コンクリート舗装の疲労破壊メカニズムについて検討する。輪荷重走行試験は、前節で述べた事前解析結果を参考に、舗装版(200mm)下に路盤材(100mm)を敷設し、水張り状態での試験を行うことで、実舗装で見られる目地部の損傷とポンピング作用を再現するとともに、試験中におけるダウエルバーおよびコンクリートのひずみデータを収集し、疲労解析モデルに反映させる予定である。なお、試験は1月から実施する予定であり、契約期日に提出する報告書には本試験結果を反映させる予定である。

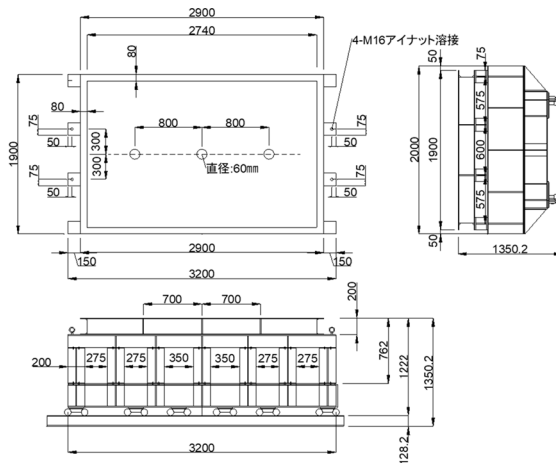


図-24 輪荷重走行試験装置

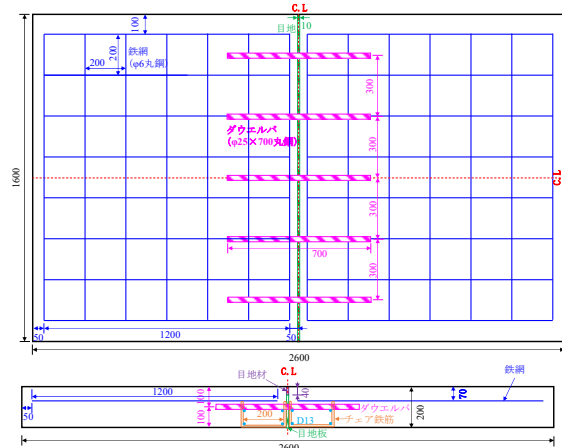


図-25 輪荷重走行試験装置



写真-2 輪荷重走行試験装置

## 5. 現場実装に向けた各機関との調整

国土交通省東北地方整備局道路工事課と調整した結果、2023年度の8月から東北地整管内でフライアッシュコンクリート舗装を実装することとなり、当初の計画から少し時期がずれたため暑中対策を講じた配合選定を行う必要がある。また、実装する秋田県内のプラントにおいて小規模の試験施工を実施することとなったため、道路工事課と議論を重ねて、フライアッシュコンクリート舗装の配合選定および施工性に関する検討を重ねて、実装準備を進める予定である。

本研究は、当初の計画通りに実物大CRCPの施工を実施した上で各種ひずみデータを収集し、これを基にフライアッシュと膨張材を併用した配合の膨張収縮挙動について複数の解析ソフトによりCRCPのひび割れリスクを評価可能なモデルを構築している。また、輪荷重走行試験の実施が若干遅れているものの、その期間内に疲労解析モデルの構築と事前解析を実施したことから、円滑な実験スケジュールに変更することができており、年度内には当初の計画と同等以上の研究成果が得られる未通りが立っていることから、順調に進捗しているものと判断される。

## ⑦特記事項

### 1. 本研究から得られた知見、学内外へのインパクト

本研究は、高度な実験と解析を駆使したデータ同化によってコンクリート舗装の性能を評価するものであり、当該分野における新たな取り組みである。現在までに提案するフライアッシュコンクリートを用いて実物大に近い連続鉄筋コンクリート舗装を施工し、施工性および耐久性について問題ないことが確認できており、膨張材の化学反応ならびに膨張材による体積変化が考慮可能な材料-構造応答連成解析システムを用いて実規模試験体の再現解析の検討を実施することで、実構造物施工において長期的なひび割れリスクをはじめとした性能を評価するために必要な計測事項（ひずみ、温湿度）を明らかにしている。また、目地部を含むコンクリート舗装の疲労解析モデルを構築し、今後実施する輪荷重走行試験とのデータ同化を進めることで、モデル化手法・疲労寿命予測手法が確立されれば、高い疲労抵抗性を有する目地構造の提案、目地部を含む普通コンクリート舗装の疲労寿命を高い精度で予測することができると考えられる。

以上のように本研究は、高耐久フライアッシュコンクリート舗装の開発と実装のみならず、コンクリート舗装の耐久性・耐疲労性に関する新たな評価手法の構築が可能な段階にあり、本格採択後1年ではあるものの、当該分野において先導的な知見を与えているものと考えられる。

### 2. 研究成果の見通しや達成度

当初計画通りにフライアッシュコンクリートを用いた実物大CRCPの施工を実施し、ここで得られたデータをマルチスケール解析に反映させることでコンクリート舗装の耐久性が評価可能なモデルを構築している。また、目地部の損傷を含めた検討については、疲労解析モデルの構築と事前解析を実施しており、これから実施する輪荷重走行試験データ同化を進めることで普通コンクリート舗装の疲労挙動解析精度が向上するものと考えられる。さらに、道路管理者と調整した結果、次年度における小規模試験施工を実施することとなり、当初計画よりも実道試行に向けて十分な準備が進められる目途が立っている。

このように、本研究は概ね当初計画通りに進捗しているものと判断される。