

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（2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 領域	[主領域] (2)持続可能なインフラメンテナンス [副領域] (4)経済の好循環を支える基盤整備	公募 タイプ	タイプI, ハード分野
③研究経費（単位：万円）	令和4年度	令和5年度	令和6年度	総合計
	4,700万円 <small>※R4は精算額、R5は受託額、R6は計画額を記入。端数切捨。</small>	3,600万円	2,000万円	10,300万円
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・名誉教授		
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。）

連続鉄筋コンクリート舗装(CRCP)は、舗装版内に配置した鉄筋の拘束により微細なひび割れを分散させる構造であり、目地部を設けないことから耐久性および走行性に優れることが知られている。設計上においては0.5mm以下の微細なひび割れは構造上の問題とならないとされているが、積雪寒冷地に供用されるCRCPにおいては、初期ひび割れの幅が許容範囲を大きく超え、そこから凍結防止剤(NaCl)混じりの水が浸入することにより供用10年未満で内部鉄筋が著しく腐食したケースが報告されている。そのため、積雪寒冷地でCRCPを広く活用していくには、ひび割れ幅を適切に抑制するとともに、コンクリート自体の遮塩性を含む耐久性を向上させるといった高耐久化を図る必要がある。

他方、前川・岩城らは、SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術の中で、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(FA)や膨張材(Ex)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・復興支援道路等に実装してきた。この種のコンクリートは舗装コンクリートとしても十分に適用可能と考えられるが、当該研究分野においては、材料および配合による強度について適正配合や疲労特性を評価した事例はあるものの、凍結防止剤散布下における材料劣化を考慮した検討は成されていない。また、FAをセメントの代替として使用したコンクリート舗装については、初期強度発現性が劣るものの、長期的な強度発現性を有すること、ひび割れ発生確率が低減することが示されているが、これらの研究は無筋コンクリート(普通コンクリート舗装)を対象としたものがほとんどである。

以上の背景により本研究では、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、SIPで培ったデータ同化手法をベースに、高耐久FAコンクリート舗装の開発と実装を行う。

昨年度(1年目)はFAの置換率および置換方法をパラメータとした供試体を作製し、要素・部材レベルにおける耐久性を評価した。次に、要素試験で得られた研究成果を基にFAの最適な置換方法を選定して、日本大学工学部キャンパス内に路盤・路床を再現したCRCPを試験施工し、CRCPの膨張収縮挙動から耐久性を評価するとともに、提案舗装の膨張収縮挙動やひび割れ発生確率を評価可能な解析モデルを構築した。また、CRCPとは別に普通コンクリート舗装の力学性能について、輪荷重走行試験時における試験条件を選定するため、FEM解析モデルを用いた事前解析を実施した。

今年度(2年目)は、秋田県内の自動車専用道路においての実装に向け、現場近傍のプラントにて実際に使用する材料を用いた配合選定を行うとともに、施工現場近傍にて施工確認試験を実施した。その結果、本研究で提案する配合で十分に施工可能であること、試験施工時に計測したひずみからひび割れリスクの低減に有効であることを明らかとした。次に、秋田県内における自動車専用道路において約270mの延長で提案するコンクリート舗装の現場実装を行った。外気温が35℃を超える厳しい環境においても施工上の問題はなく、所定の時間内で施工を完了した。また、実道においても舗装内部のひずみを計測し、これを入力値としたFEM解析を行うことでCRCPのひび割れリスクについて検討するとともに、実際のひび割れ状況と相互比較することでその妥当性を評価した。加えて、現地においてFWD試験による荷重伝達性能およびすべり抵抗性についても併せて検討した。

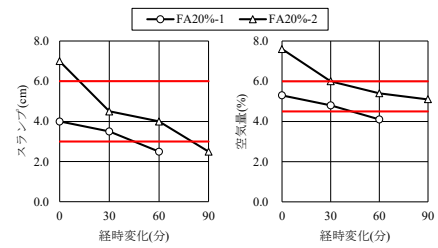
なお、輪荷重走行試験による普通コンクリート目地部の試験については試験装置の動力が破損したこともあり試験が遅れているものの、年度末の報告書にて試験データを報告する予定である。

⑥これまでの研究経過、研究成果、目的・目標の達成状況

1. フライアッシュと膨張材を併用した連続鉄筋コンクリート舗装の現場実装とその評価

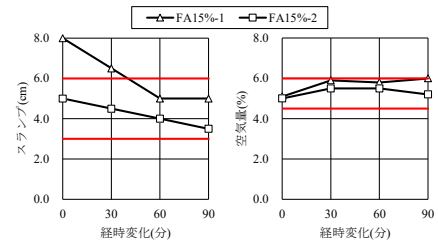
a) 利用する生プラントでの実機試験

表1-1に2023年4月に実装箇所近傍の生コンプラントで実施した実機試験練り配合を示す。表より、FAの置換率および置換方法は昨年度までに得られた知見をもとに、セメントの質量に対し内割5%、外割で15%、計20%の置換率とする方法を採用した。なお、ひび割れ対策としてExを20kg/m³混和している。また、本施工が機械施工(スリップフォーム工法)であることを考慮して目標スランプを4±2cm、さらに凍結融解抵抗性向上を目的に目標空気量を5.0%±1.0%に設定した。出荷プラントから現場までの到着時間が40~60分程度であることから出荷時のスランプ、空気量を上げ越した配合(FA20%-1)と、目標範囲内とした配合(FA20%-2)の2水準について、スランプ、空気量の経時変化を0, 30, 60, 90分で確認した(図1-1)。その結果、出荷から60分時点でスランプは2~3cm程度、空気量は1.0~1.5%程度低下するという若干ロスが大きい傾向であった。また、強度は材齢28日でFA20%-1は5.16N/mm²、FA20%-2で4.96N/mm²といずれも、設計強度を満足する結果であったものの、昨年度までの室内試験で得られた既往の結果(材齢28日で6.50N/mm²)より明らかに強度が低い結果であった。本施工が2023年の8月を予定していることから、施工性の向上と強度確保の観点からFAの置換方法を外割15%に変更することとした。表1-2、図1-2に2023年7月に実施した実機試験練りについてコンクリートの配合およびスランプ、空気量の経時変化を示す。なお検討配合は前節と同条件の2水準である。図より、スランプ、空気量の上げ越しを行わずとも60分時点で目標範囲に収まる結果であり、以降の試験施工について出荷時のスランプ、空気量の上げ越しは行わないこととした。また、今回の実機試験で



スランプ 空気量

図1-1 フレッシュの経時変化



スランプ 空気量

図1-2 フレッシュの経時変化

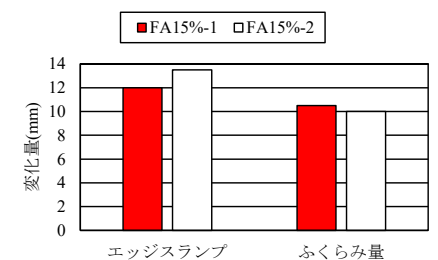


図1-3 エッジスランプ試験結果

表 1-1 コンクリートの配合(4月)

ID	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							混和剤(C×%)		C.T. (°C)	材齢28日曲げ強度 (N/mm ²)
				W	C	FA	Ex	S ₁	S ₂	G	AE減水剤	AE剤		
FA20%-1	47.9	37.3	33.3	160	334	75	20	333	222	1162	1.0	0.008	17.0	5.16
FA20%-2											1.4	0.080	16.0	4.96

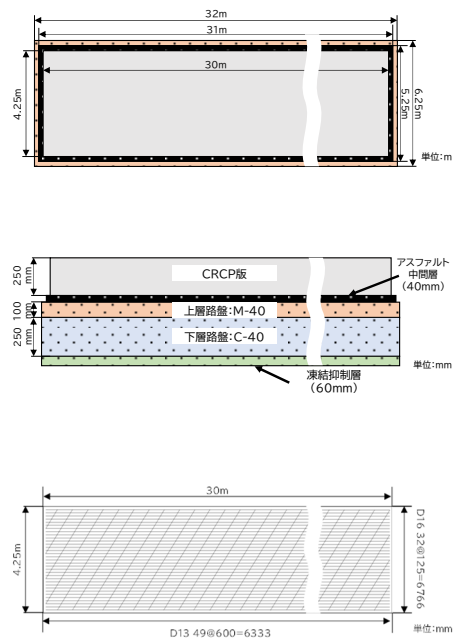
表 1-2 コンクリートの配合(7月)

ID	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							混和剤(C×%)		C.T. (°C)	材齢28日曲げ強度 (N/mm ²)
				W	C	FA	Ex	S ₁	S ₂	G	AE減水剤	AE剤		
FA15%-1	45.3	37.3	33.3	160	353	56	20	334	222	1170	1.3	0.052	26.0	4.77
FA15%-2												0.052	26.8	-

は、本施工が機械施工(スリップフォーム工法)であることから、現場到着時のフレッシュコンクリートの変形抵抗性を評価するためにエッジスランプ試験を実施した(図1-3)。その結果、コンクリート排出から60分時点で12~14mmと施工業者の社内規格である10mm以内を満足していないものの、十分に施工可能であると判断されるため、配合を変更せず以降の試験施工、本施工を行った。

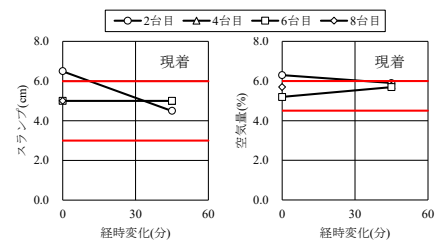
b) 本施工箇所近傍での施工確認試験

実機試験で決定した配合について施工性の検証を行うため、本施工現場近傍にて実物大舗装に打込み試験施工を実施した。図1-4に試験施工のCRCPの舗装構成および、配筋図を示す。CRCP版は長さ30m、幅4.25m、厚さ0.25mであり、CRCP版下にはアスファルト(As)中間層および上層路盤(M-40)、下層路盤(C-40)、さらに寒冷地であるため凍上対策として凍結抑制層(C-40)を構築した。CRCP版は縦断方向にD16の異形鉄筋を125mm間隔(鉄筋比:0.64%)、横断方向(縦断方向鉄筋から斜め60°)はD13の異形鉄筋を600mm間隔(鉄筋比:0.08%)で配置した。図1-5に各アジテータ車の生コン出荷時から現着時のスランプ、空気量結果を示す。なお、当日の外気温は27℃程度と暑中コンであり、アジテータ車の到着が概ね40~60分と想定通りに現着することを確認した。図より、スランプ・空気量いずれも大きなロスがなく現着時で目標範囲内を満たす結果であった。また、当日の交通状況や試験的にプラント内でフレッシュ性状を確認していたため、出荷から打込み完了までに90分程度経過した箇所があったものの、施工自体に大きな問題はなく、出荷から打込み、仕上げ、ほうき目仕上げのいずれにおいても問題がないことを確認した。一方、曲げ強度(図1-6)については、プラントで作製した150mm×150mm×530mmの型枠(以降、型枠大)を使用していたが、試験供試体の寸法の違いにより曲げ強度が変動することが考えられるため、試験施工、本施工では100mm×100mm×400mmの型枠(以降、型枠小)を使用した場合についても検討した。その結果、材齢28日の両者の値は一致しており、設計基準曲げ強度を満たす結果であった。また、本施工は試験施工より19日後に実施することが決定していたため、強度発現性は材齢7日時点で評価することとなったが、その時点で十分な強度が得られていることを確認したため、配合修正等は行わず本施工を実施した。



(c) 配筋図

図 1-4 舗装構成(試験施工)



スランプ 空気量

図 1-5 フレッシュ性状(試験施工)

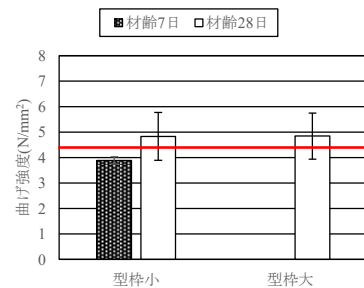


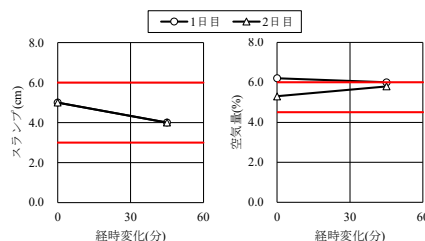
図 1-6 曲げ強度試験結果(試験施工)

c) 現場実装とその評価

写真1-1に本施工状況を示す。本施工は2023年8月の外気温38℃の厳しい環境下で実施した。なお、舗装構成は試験施工と同様であり、縦断方向は270m、鉄筋の配筋間隔および鉄筋比は試験施工と同様である。施工延長は、1日目148m、2日目122mの計2日間で実施した。また、前述の通り、コンクリートの配合は試験施工と同様とした。図1-7に各アジテータ車の生コン出荷時から到着時のスランプ、空気量結果を示す。コンクリート温度は1日目、2日目いずれも出荷時、到着時で大きな変動なく30℃程度と試験施工と同様であり、スランプのロスが1cm程度、空気量に関してはほぼロスなしと試験施工同様いずれも大きなロスがなく目標範囲内を満たす結果であった。硬化後の品質について図1-9に材齢77、78日時点での舗装表面のひび割れ状況を示す。横断方向に概ね10~20m間隔でひび割れが発生しており、ひび割れ幅は最大で0.2mmであった。猛暑の厳しい環境での施工であるものの、膨張材による収縮緩和によって構造上問題となる0.5mm以上のひび割れは確認されなかったことから、FAとExを併用したコンクリートは施工性に問題がなく、ひび割れ抑制にも有効な手段であることが確認された。また、曲げ強度(図1-8)については、材齢28日時点では供試体寸法の違いによる強度の違いは見られず、1日目、2日目の両者の値は同程度かつ、いずれも設計曲げ強度を満たす結果であった。さらに、提案配合についてはFAの混和により長期の強度増進が見込めることから、従来の舗装配合よりも各種耐久性向上が期待される。今後は舗装の機能として求められる支持力や表面のすべり抵抗性を評価するなど追跡調査を行う予定である。



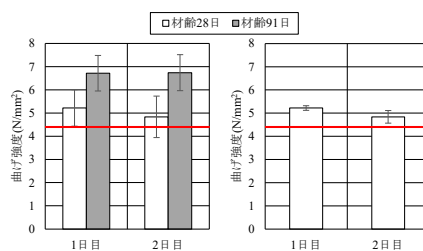
写真 1-1 本施工状況



スランプ

空気量

図 1-7 フレッシュ性状(本施工)



型枠小

型枠大

図 1-8 曲げ強度試験結果(本施工)

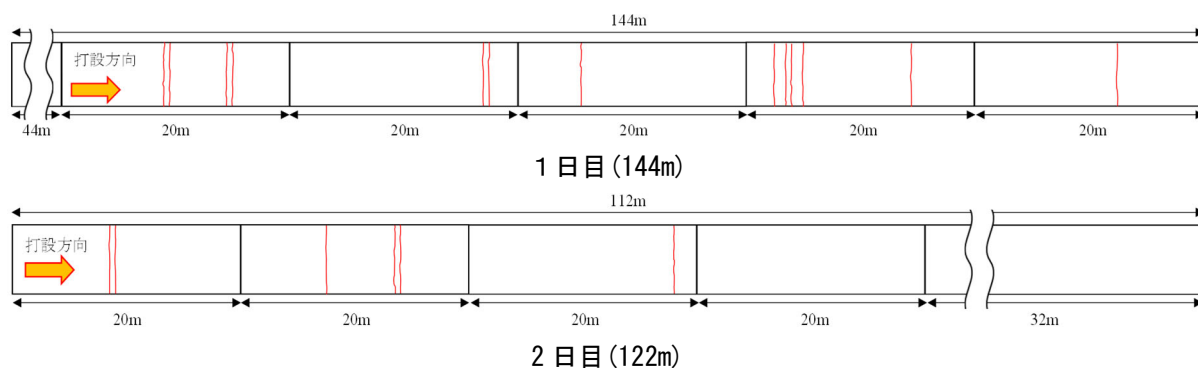


図 1-9 ひび割れ状況

2. 実装したFA舗装版の膨張収縮挙動と再現解析によるひび割れリスク評価

a) 本施工したCRCP版内の膨張収縮挙動

図2-1に実装したCRCP版内部のひずみゲージ設置位置を示す。前述の通り、施工は2日間で行われており、ロガー設置の関係上、2日目区間(122m)のみの計測となった。ひずみゲージは図2-1に示すように横断方向中心位置(端部から2.12m)、縦断方向は2日目工区の打設開始位置から61m、66mの箇所に2か所(A-1、B-1)、A-1設置箇所の横方向鉄筋と同様の鉄筋で横断方向端部から約1mの位置に1か所(A-2)の計3か所設置した。なお、A-1、B-1については縦断方向(X)、横断方向(Y)、鉛直方向(Z)にひずみゲージを設置しており、A-2についてはX、Y方向のみとした。また、X方向のひずみゲージは熱電対付きひずみを用いており、各位置のコンクリート内部の温度についても計測している。さらに、各計測位置近傍の縦方向鉄筋、横方向鉄筋にもひずみゲージを設置しており鉄筋のひずみについても計測した。なお、現在材齢91日までの計測を行っているが、計測点間のコンクリート内部温度、ひずみの推移は概ね同様であったため本稿ではA-1点の結果を示す。

図2-2～図2-5にCRCP版内の温度およびひずみの推移を示す。なお、昨年度日本大学工学部構内に施工したFAとExを混和したCRCPの結果(以降、試験施工)を併記している。図より、材齢7日までに着目すると、試験施工では、最大温度は41.6℃であり、ひずみの推移では打設直後より全方向で膨張する傾向を示し、Xは100μ程度、Xに対し鉄筋比が低いY、鉄筋の拘束を受けないZでは350~400μ程度であった。一方、本施工では、打設時のコンクリート温度は30℃、最大温度は57.8℃であり、Xは0μで推移し、Yでは165μ、Zでは356μと試験施工よりも膨張量は低い結果であった。これはコンクリートの内部の温度が最大で57.8℃と明らかに高いことで温度ひずみの影響が大きく見かけのひずみが小さくなったものと考えられる。さらにX方向では試験施工は長手方向が40mであったのに対して本施工は122mと3倍程度異なることで、寸法効果により十分な膨張ひずみが導入されなかったものと考えられる。

また、91日時点では、XよりもY、Zで収縮ひずみが増大しているが、これは前述の通り、本施工の横断方向にひび割れが生じたことで応力が緩和されたことが影響しているものと推察される。昨年度の結果よりExの混和によりひび割れリスクが低減することを明らかとしており、本施工は外気温38℃という、厳しい条件下での打設であったものの、構造上問題となる0.5mm以上のひび割れは発生しておらず、Exの混和によって重大なひび割れの発生を抑制し得たものと考えられる。

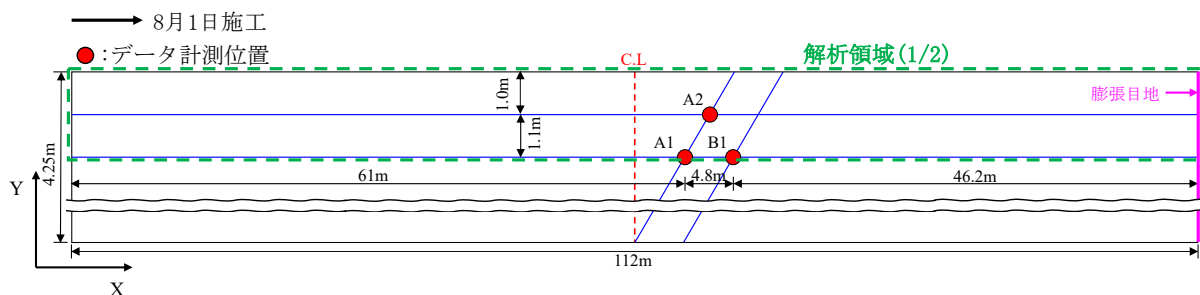
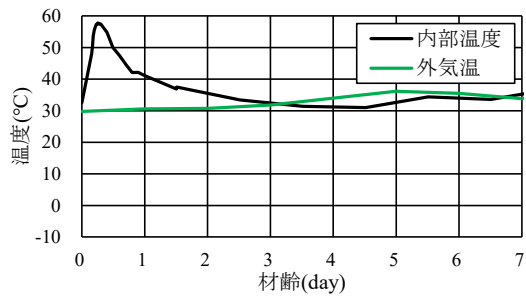
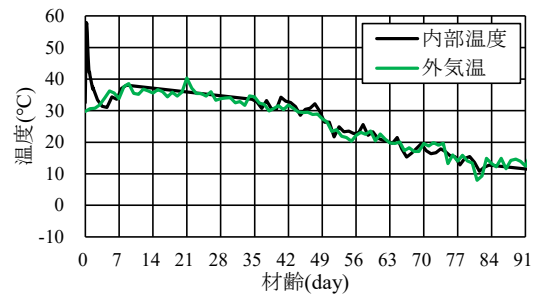


図 2-1 ひずみゲージの設置位置

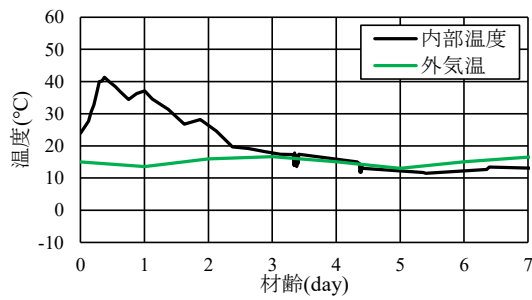


(a) 材齢 7 日まで

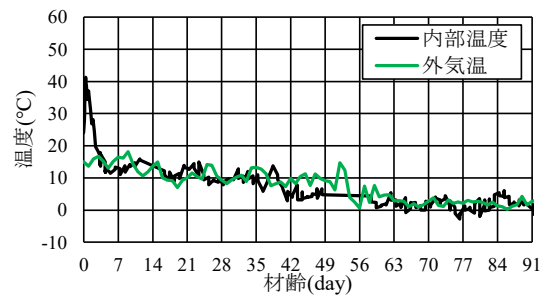


(b) 材齢 91 日まで

図 2-2 温度推移(本施工)

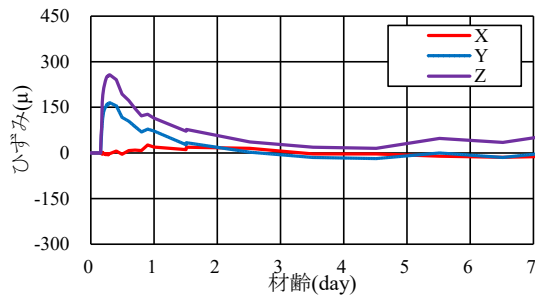


(a) 材齢 7 日まで

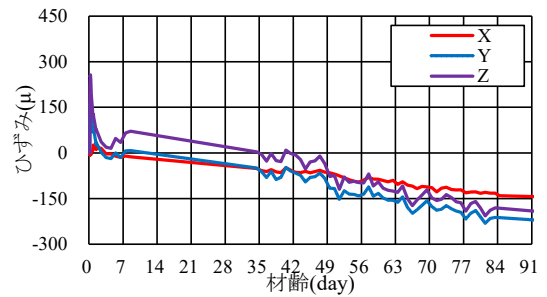


(b) 材齢 91 日まで

図 2-3 温度推移(日大試験施工)

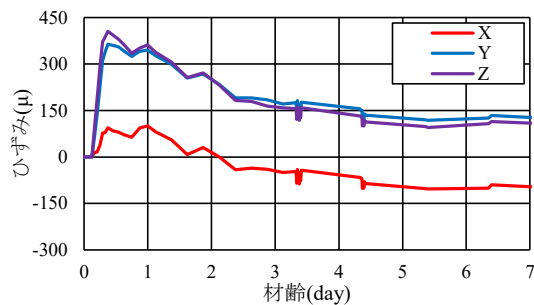


(a) 材齢 7 日まで

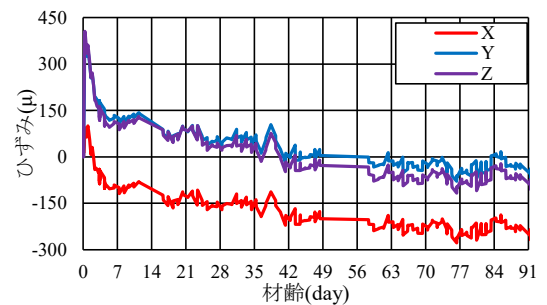


(b) 材齢 91 日まで

図 2-4 ひずみ推移(本施工)



(a) 材齢 7 日まで










(b) 材齢 91 日まで

図 2-5 ひずみ推移(日大試験施工)

b) 再現解析によるひび割れリスク評価

前節で得られたCRCP版内の温度・ひずみ挙動を基に，汎用性3次元有限要素解析ソフトに本舗装モデルを再現し，CRCPのひび割れリスクを解析的に検討した．図2-6に解析モデルを示す．厚さ5000mmの路床および路体の上に実施工と同様の舗装構成を再現した．解析領域は舗装の対称性を考慮し，2日目工区122m間のうち1/2とした(図2-1)．CRCP版とAs中間層の界面に接着層がないことから，路盤によるCRCP版の拘束はほとんどないものと考えられる．そのため，モデルの拘束条件についてはCRCP版の端部，路盤および路床の露出面を無拘束とし，路床の底面およびモデルの対称面を単純支持とした(図2-7)．温湿度(図2-8)は，本施工箇所近傍に設置した温湿度ロガーにより計測したデータを使用し，湿度については，材齢7日まで散水養生を行っているため，その期間の湿度を100%とした．また，実験によって得られた圧縮強度(図2-9)，乾燥収縮ひずみおよびE_xの混和により導入された膨張ひずみを精緻に反映させるため，乾燥収縮の影響を考慮するために細孔分布計測(図2-10)，JIS A6202 Bによる一軸拘束膨張試験結果(図2-11)によって得られたデータを入力値とした．表2-1に路盤，路床および路体の材料物性示す．ここで，路盤材のCBR試験結果により，路盤の弾性係数を算出した．

- | | | | | | | |
|---|--------------|---|---------------|---|---|-------|
|  | : CRCP版 |  | : As中間層 |  | : 上層路盤(M-40) | |
|  | : 下層路盤(C-40) |  | : 凍結抑制層(C-40) |  | : 路床+路体 | |
| | | | | |  | : 対称面 |

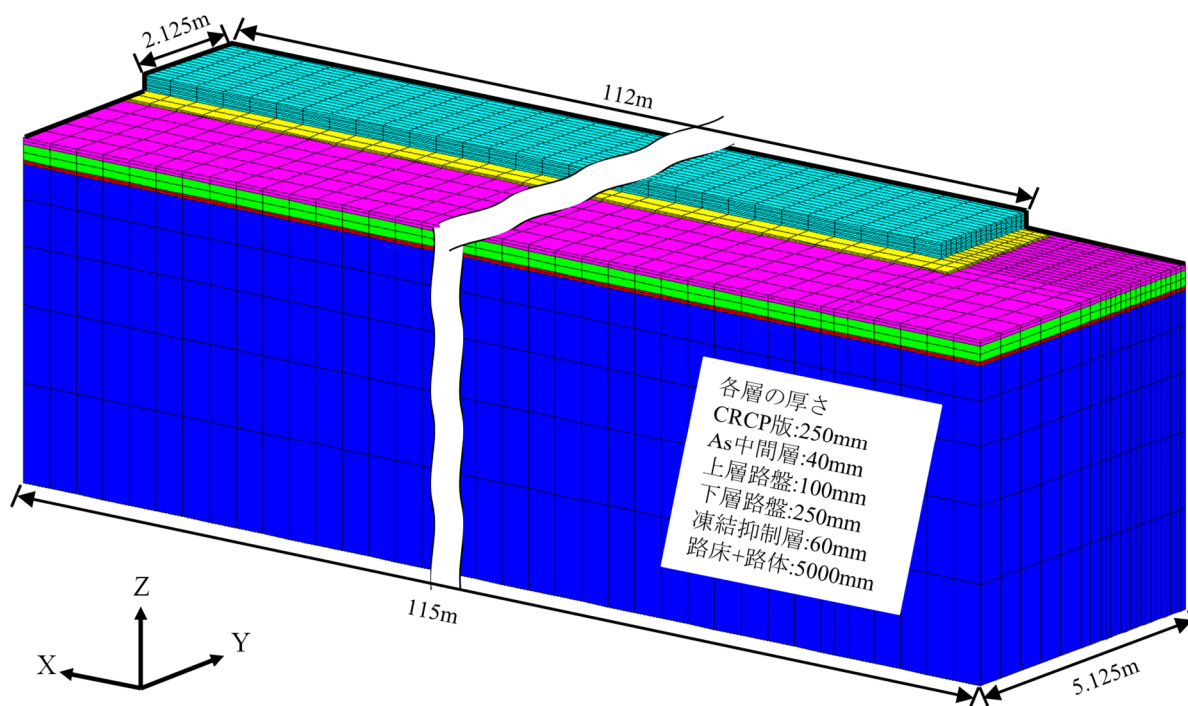


図 2-6 解析モデルの概要

図2-12に温度解析の結果を示す。図より、初期材齢を含む解析値は実測値と一致する結果であり、本解析モデルによりCRCP版内の温度を再現可能であることが確認された。図2-13, 14にコンクリートおよび鉄筋ひずみ推移の解析結果を示す。図より、全方向においても解析値は実測値と位置しており、本解析モデルを用いることで、CRCP版内のひずみ挙動を精度よく再現し得ることが確認された。図2-15に本モデルを用いたCRCP版中心部(中心)および中心位置表面(表面)に生じた引張応力の推移を示す。ここでは、Exの効果を検証するため、FAを単体で混和した配合についても併せて検討した。なお、解析対象としたCRCPにおいては、ひび割れが発生したとともに応力が分散すると考えられたが、本稿ではCRCPのひび割れリスクを検証するため、ひび割れによる応力開放を考慮しない解析結果を示す。図より、いずれの条件においても打設してから材齢91日時点まで応力が増大している。これは、乾燥収縮の影響に加え、夏期に打設したため、材齢経過に伴い気温が低下しており、温度応力の影響を大きく受けたためと考えられる。Exの混和の有無で比較すると、Exを混和した条件では明らかに応力が低く、ひび割れリスクが低減できることを示している。また、Exを混和した場合において中心と表面を比較すると、材齢7日までは、散水養生の影響により表面の応力が小さいものの、材齢42日以降は表面の応力が中心部の応力を上回る結果であった。これは、前述の通り、表面がより乾燥収縮・温度応力の影響を受けたためと考えられる。

図2-16にひび割れ指数を示す。なお、ひび割れ指数は以下の式3-(2)によって求められる。

$$I_{cr}(t) = f_t(t)/\sigma(t) \quad \text{式2-1}$$

$$f_t(t) = 0.13 \times f_c(t)^{0.85} \quad \text{式2-2}$$

ここで、 $I_{cr}(t)$ ：材齢 t におけるひび割れ指数、 $f_t(t)$ ：材齢 t 日のコンクリート引張強度 (N/mm²)、 $\sigma(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの応力 (N/mm²)、 $f_c(t)$ ：材齢 t 日のコンクリート圧縮強度(N/mm²)(図2-9) 図より、FAを単体で用いた場合、表面・中心いずれも材齢初期からひび割れ指数が1.0以下に低下しているのに対し、FAとExを併用した配合では材齢91日までひび割れ指数1.0以上を維持する結果となった。また、ひび割れ指数により算出される材齢91日でのCRCP版中央におけるひび割れ発生確率は、FA+Exで25%、FAで90%であり、表面はFA+Exで51%、FAで100%と、Exの混和によりひび割れリスクが低減する結果であった。

以上より、本施工したCRCP版においてもExの混和により舗装表面のひび割れ発生リスクを低減し得ることを確認した。

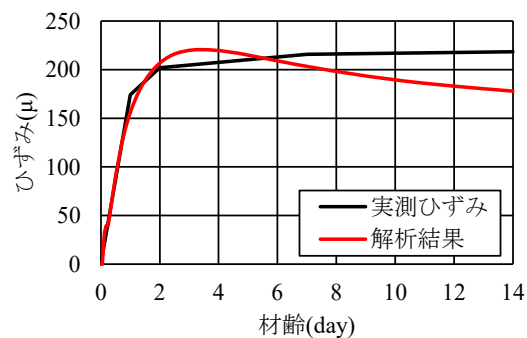
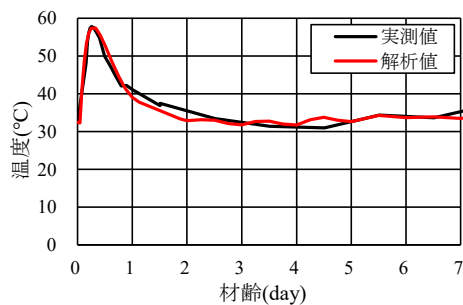


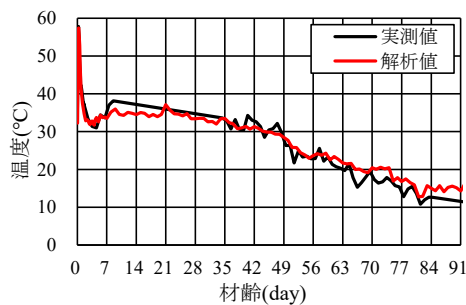
図 2-11 一軸拘束膨張試験の結果

表 2-1 路盤、路床および路体の材料物性

	弾性係数(MPa)	線膨張係数(μ/°C)	ポアソン比
As中間層	1000	30	0.35
上層路盤	872	10	
下層路盤	766		
凍結抑制層	766		
路床+路体	298		

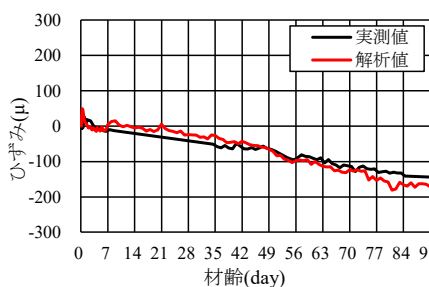


(1) 材齢 7 日まで

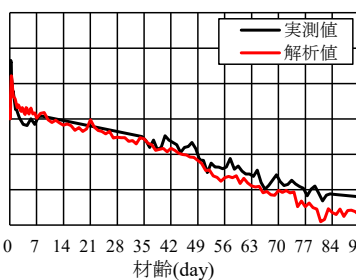


(2) 材齢 91 日まで

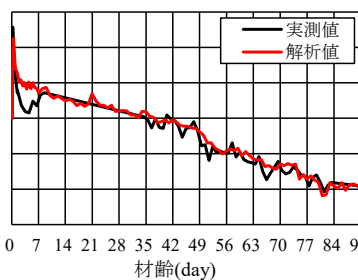
図 2-12 温度解析結果



(1) X 方向



(2) Y 方向



(3) Z 方向

図 2-13 コンクリートひずみの解析結果

図2-17にCRCP版表面のひび割れ発生状況および解析結果を示す。なお、Exを混和しない場合のひび割れ解析結果についても併記している。図より、CRCP表面に実際に発生しているひび割れは、2日目の区間では最大で0.3mmであり、構造上問題となるひび割れの発生は認められない。解析結果では、FA+Exでは0.2mm程度のひび割れがCRCP版表面に発生する結果であり、ひび割れの発生位置にズレがあるものの、一定の精度で解析し得る結果であった。一方、FAでは0.5~0.7mmのひび割れの発生が確認された。

前述の通り、舗装版内のExの混和により応力が低減していることから、舗装表面に生じるひび割れを分散し、構造上問題となるひび割れの発生を抑制したものと考えられる。以上より、本研究で提案されたモデルを用いることで、CRCP版内の温度・ひずみ挙動を精度よく再現し得ることが確認された。また、外気温38℃という厳しい環境でCRCPを打設したが、Exを混和することでコンクリート版内に発生する引張応力を低減し、過度なひび割れの拡幅を抑制し得ることが確認された。今後は、ひび割れ発生位置の予測精度向上やひび割れの発生しない設計・施工方法について検討する予定である。

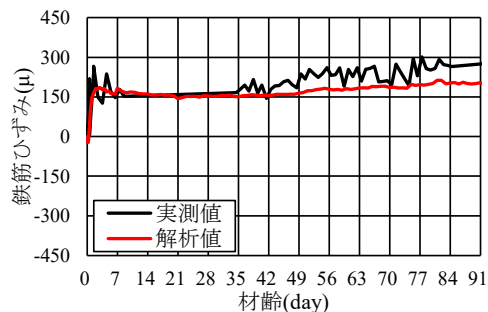
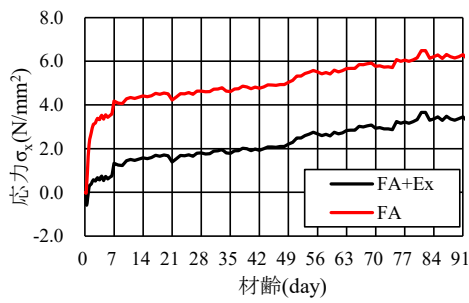
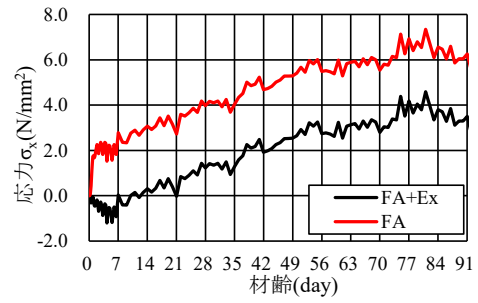


図 2-14 鉄筋ひずみの解析結果

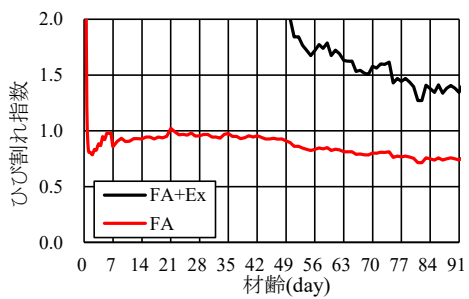


(1) 中心

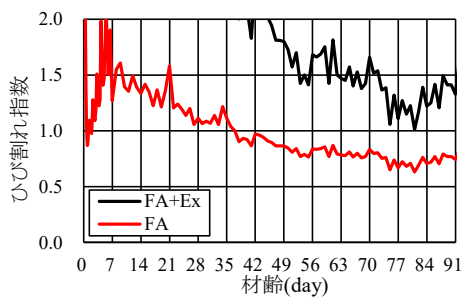


(2) 表面

図 2-15 CRCP 版に生じた引張応力



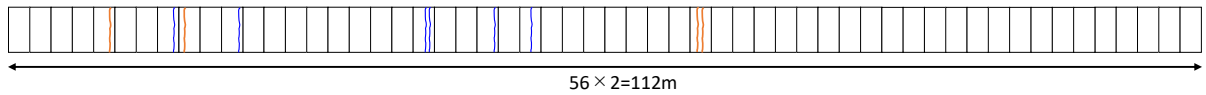
(1) 中心



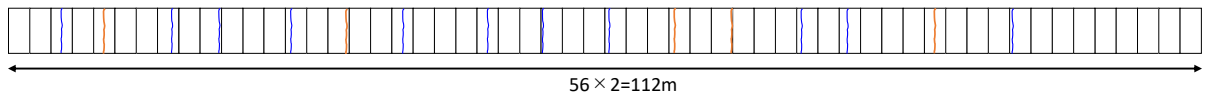
(2) 表面

図 2-16 ひび割れ指数

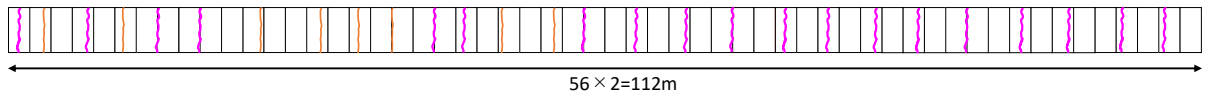
~~~~~ : ひび割れ幅 < 0.2mm     
 ~~~~~ : ひび割れ幅 0.2~0.5mm     
 ~~~~~ : ひび割れ幅 > 0.5mm  
 —————→ 8月1日に施工



(1) CRCP 版表面のひび割れ発生状況



(2) CRCP 版表面のひび割れ解析結果 (FA+Ex)



(2) CRCP 版表面のひび割れ解析結果 (FA)

図 2-17 CRCP 版表面のひび割れ発生状況およびその解析結果

### 3. マルチスケール解析を用いたCRCPの性能評価

膨張材反応を考慮したマルチスケール解析システムを用いて、様々な配合の実規模CRCPの長期性能評価を行った。実験と同じ条件下で、1/4の対称境界条件で実規模CRCPをモデル化し、下部構造を弾性要素でモデル化することで、実験で測定された3方向のひずみ挙動を再現できることがわかった(図3-1)。ひずみ挙動を検証したモデルを用いて、コンクリート応力を抽出し(図3-2)、土木学会標準示方書で規定されるひび割れ指数に基づいて、ひび割れリスクを定量的に求めた(図3-3)。その結果、膨張材を添加したフライアッシュ混和配合は、他の2種類の配合に比べて相対的にひび割れリスクが高い結果が得られた。但し、膨張材の有無で結果を比較すると、膨張材が効果的に働き、ひび割れリスクを低減させていることが確認された。

普通ポルトランドセメントを用いた配合と、フライアッシュを混和した配合で作製された円柱試験体の塩分浸透試験の再現解析を実施した。各配合の91日ならびに182日間の塩分浸透挙動をマルチスケール解析システムを用いて再現することに成功した(図3-4)。解析期間を延長して長期の解析を実施した結果、フライアッシュを混和することで、長期の塩分浸透深さを大幅に削減し、優れた耐久性を確保できる。

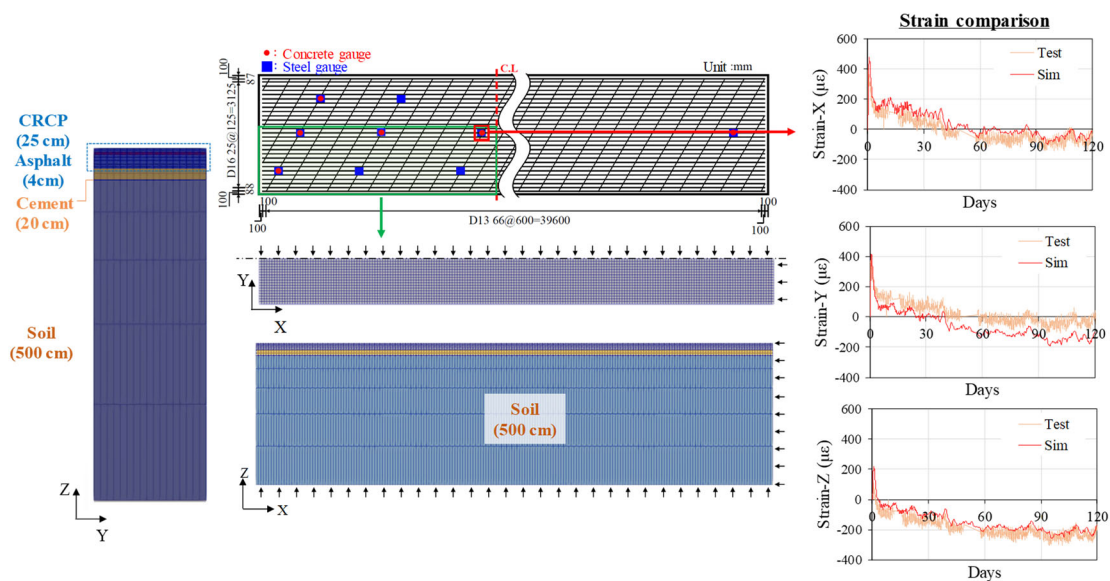
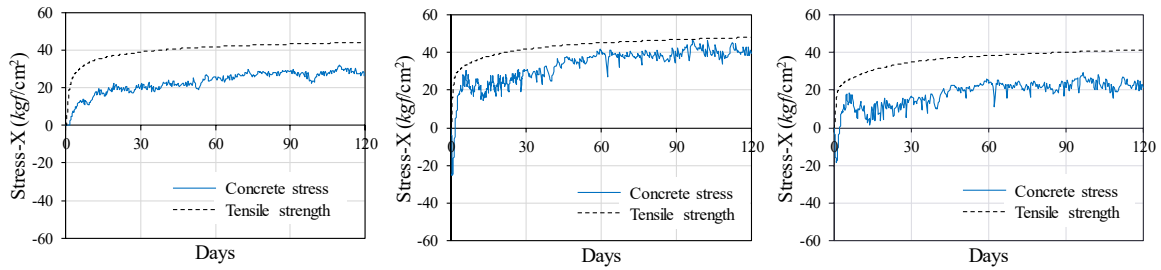
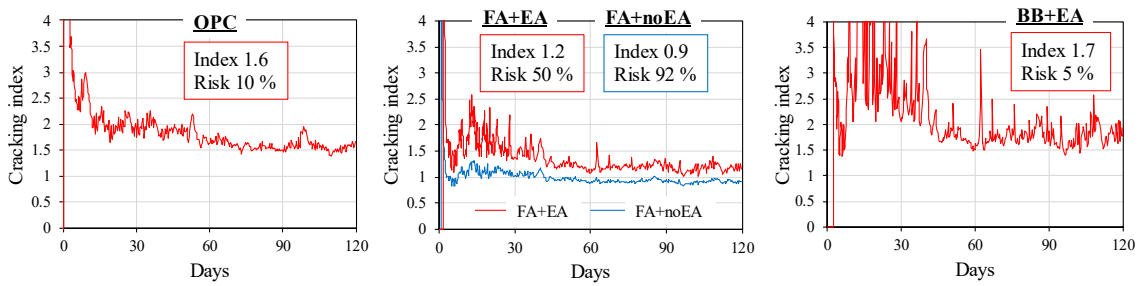


図 3-1 実規模モデルを用いた 3 方向ひずみの解析結果の検証



(a) 普通セメント (b) フライアッシュ混和+膨張材 (c) 高炉セメント混和+膨張材

図 3-2 各配合の応力の計算結果



(a) 普通セメント (b) フライアッシュ混和+膨張材 (c) 高炉セメント混和+膨張材

図 3-3 各配合のひび割れリスク計算結果

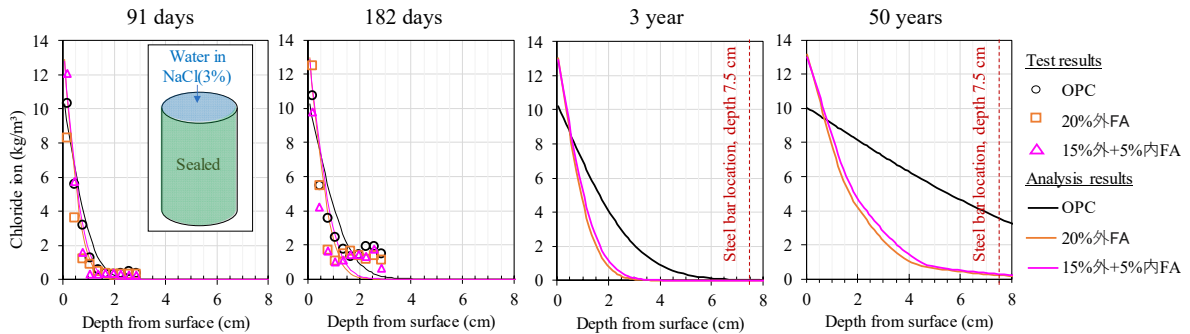


図 3-4 各配合の塩分浸透解析結果



#### 4. 目地を有する普通コンクリート舗装の疲労解析モデル構築と事前解析の結果

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、地盤（路床土）条件と荷重条件についてパラメータ解析を行った(図 4-1)。

解析の結果、輪荷重を 200kN 程度とすると、载荷初期から損傷が舗装全体に生じるのに対し、荷重を 100kN 程度にすると、载荷途中で舗装目地部に損傷が集中した(図 4-2)。実際の舗装ではより小さな荷重で多くの疲労回数となるため、後者の方が実際の破壊に近いと考えられる。目地部の損傷に着目する本実験では、疲労荷重を 100kN 以下に抑える必要があることが明らかとなった。さらに地盤（路床土）の相対密度（RD）を 60%程度に調整できれば、1週間程度で目地部に損傷が生じることが分かった。普通コンクリート舗装は、輪荷重によって目地部で損傷が生じやすいことが報告されている。上記のような実験条件が、実現象を解明するうえで適した条件設定であると考えられる。

実際には、実験中に地盤（路床土）の締固めが起こり、相対密度も変化することが想像される。実験の前後で地盤（路床土）の剛性を小型 FWD で計測し、実験結果の分析に役立てるのが望ましいと考えている。

なお、輪荷重走行試験のスケジュールは遅れているものの、年度内に開始の目途が立っており、年度末に試験結果を報告する予定である。

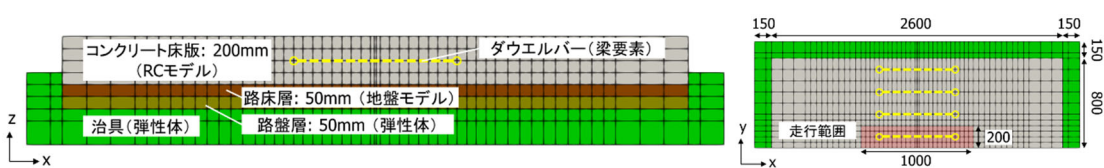


図 4-1 検討に用いた数値解析モデル化の例（側面図）



図 4-2 解析結果の例-試験開始約 7 日後（左図：100kN、右図：200kN）RD=60%

## ⑦中間評価で指摘を受けた事項への対応状況

(1年目の研究を対象とした中間評価で示された「修正内容」「指摘事項」等を記載するとともに、それへの対応状況を記入。)

1. 膨張材の過小評価とともに、解析において圧縮ひずみの減少量の過小評価もあると考える。解析においてもひずみ変化が、実測と解析で収縮傾向がクロスする現象がみられるので、その評価が望まれる。データ同化手法をどのように解析・開発に応用・利用しているかが理解しにくい。

コンクリートの乾燥収縮ひずみおよび膨張材により導入される膨張ひずみを精緻に反映させるため、細孔分布計測および一軸拘束膨張試験を行い、提案配合における物理性状を評価し、解析モデルに反映させることで解析モデルの精度向上を検討した。その結果、昨年度の報告データと比して実測値に整合する結果が得られている。局所的な日照や湿度等の影響により若干ひずみの差異が生じている箇所もあるが、指摘内容にある『実測ひずみと解析ひずみにおける収縮傾向の違い』は十分に解消されているものと判断される。また、今年度は実道におけるひずみデータを取得した上で、昨年度に構築した解析モデルに反映させることで高い精度でひずみ挙動を再現し得る結果が得られており、コンクリート舗装の施工時における環境条件や路盤条件等を基に解析を行うことで、ひび割れの発生リスクを事前に評価することが可能になると考えられる。

2. 当初計画より若干遅れているようであるが、次年度のフィールド試験等の計画ができているようであるので着実に進めていただきたい。

当初計画通りにフライアッシュと膨張材を併用した連続鉄筋コンクリート舗装を秋田県内の自動車専用道路に実装した。事前のプラント実機試験練りおよび試験施工を追加検証したことで、35℃を超える厳しい環境においても問題なく施工が完了している。

3. フライアッシュだけではなく高炉スラグ微粉末や膨張材などの混和材の舗装適用にまで研究の成果を応用できるため、フライアッシュの優位性を明確にしてこれらを考慮したまとめとしていただきたい。

膨張材の効果については、マルチスケール解析を用いたひび割れ抵抗性の検討を進め、膨張材の混和による効果を評価している。

高炉スラグ微粉末とフライアッシュの比較については、他のコンクリート構造物を対象とした研究によりフライアッシュの優位性は十分に示されているものの、本研究開発においても高炉スラグ微粉末を舗装配合に適用した際の耐久性を追加検証する予定であり、次年度に作成する高耐久コンクリート舗装の手引きにも反映させる予定である。

## ⑨研究成果の発表状況

(本研究から得られた研究成果について、学術誌等に発表した論文及び国際会議、学会等における発表等があれば記入。)

### [国内学会発表]

1. 紅林虎太郎, 白鳥卓実, 菅野日南, 何宗耀, 前島拓, 岩城一郎: 各種混和材を併用した連続鉄筋コンクリート舗装の膨張収縮挙動に関する実験的検討, 土木学会, 令和4年度土木学会東北支部技術研究発表会講演原稿集, V-10, 2023
2. 何宗耀, 相内豪太, 前島拓, 岩城一郎: 各種混和材を用いた連続鉄筋コンクリート舗装のひび割れリスクに関する解析的検討, 土木学会, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会講演原稿集, V-188, 2023
3. 何宗耀, 相内豪太, 前島拓, 岩城一郎: 各種混和材を用いた連続鉄筋コンクリート舗装のひび割れ解析に関する検討, 土木学会, 第28回舗装工学講演会講演集, PL2023-035, 2023
4. 前島拓, 何宗耀, 相内豪太, 岩城一郎, 吉田雅義, 村岡克明, 藤谷雅嘉: フライアッシュと膨張材を併用した連続鉄筋コンクリート舗装の各種耐久性評価, 日本道路協会, 第35回日本道路会議講演原稿集, 論文番号 3078, 2023

### [国際会議発表]

1. Tomoki Nagata, Hyo Eun Joo, Yuya Takahashi: Investigation of the Influence of Asphalt Layer Bonding on the Strain and Stress Behavior of Continuously Reinforced Concrete Pavement, In: The 3rd ZHITU Symposium on Advances in Civil Engineering, Tokyo, 20-22 August, pp.78-80, 2023
2. Tomoki Nagata, Hyo Eun Joo, Yuya Takahashi: Numerical Simulation of Early Age Strain Behavior of Lab-scale Specimens and Full-scale Continuously Reinforced Concrete Pavement with Exopansive Additives, The 3rd International Conference on Green Construction and Engineering Education, Bali, 8-10 August, 2023
3. Hyo Eun Joo, Tomoki Nagata, Yuya Takahashi: Numerical Investigation on Cracking Risk of Continuous Reinforced Concrete Pavements, The 3rd International Conference on Green Construction and Engineering Education, Bali, 8-10 August, 2023

### [受賞など]

1. 第35回日本道路会議 優秀論文賞

受賞者: 前島拓, 何宗耀, 相内豪太, 岩城一郎, 吉田雅義, 村岡克明, 藤谷雅嘉

論文題目: フライアッシュと膨張材を併用した連続鉄筋コンクリート舗装の各種耐久性評価

## ⑨研究成果の活用方策

(本研究から得られた研究成果について、実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開等を記入。また、研究期間終了後における、研究の継続性や成果活用の展開等をどのように確保するのかについて記述。)

### 1. 本研究から得られた研究成果について、実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開等

本研究では、従来よりも高耐久性なコンクリート舗装を35℃という厳しい環境の中で自動車専用道路に適用し、問題なく施工を完了した上で、構造上の問題となるひび割れの発生を抑制可能であることを示している。これは、①要素レベルでのFAコンクリートの適切な置換方法について検討するとともに、②施工方法・施工時期を見据えた実機試験練り、および③試験施工による施工性確認を行い、現場実装時の課題を事前に検証・把握した上で④現場実装を行う、といったプロセスでリスクマネジメントを行いながら現場実装に向けた準備を進めたことによるものと考えられる。今後は、東北地方整備と連携した上で高耐久コンクリート舗装の手引きを作成するとともに、本研究で行った実装プロセスを体系化し、適切にリスクマネジメントを行うことの重要性を示すことにより、東北地方における高耐久コンクリート舗装の展開を行っていく予定である。

また、前述した各試験で得られたデータを基に、実施工箇所のコンクリートや鉄筋のひずみ挙動、およびコンクリート版に発生するひび割れ性状を一定の精度で再現し得る解析モデルを構築したことで、施工前段階においてひび割れ発生リスクを定量的に評価することが可能となり、現場適用時におけるリスク回避に大きく貢献することができるものと評価される。次年度以降は本モデルの精度をさらに向上させることで、より高精度にひび割れリスクが評価可能な解析ツールを構築する予定である。

### 2. 研究期間終了後における、研究の継続性や成果活用の展開等をどのように確保するのか

本研究では、現場実装に際して、施工性と強度発現性を確保するためにフライアッシュの置換率を20%から15%に引き下げている。実機プラントにおいてフライアッシュを一定割合で外割置換した際に十分な強度発現性が得られない要因は未解明であり、今後の検討課題として研究を進める予定である。また、本研究ではコンクリート舗装に発生するひずみや応力、ひび割れ性状、および塩分浸透性を評価可能な解析モデルを構築したものの、疲労解析を含めた長期耐久性を評価するには至っていない。次年度以降は、長期の耐久性および疲労抵抗性を考慮した予測シミュレーション解析モデルを構築し、設計段階において長期的な耐久性ならびにLCCを評価可能なツールを開発する予定である。

なお、これらの継続研究で得られた成果は、前述した高耐久コンクリート舗装の手引きに適宜反映させていく予定である。

## ⑩特記事項

(本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入。)

### 1. 本研究によって得られた知見および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。

今年度は、昨年度までに検討を進めてきたフライアッシュと膨張材を併用した高耐久コンクリート舗装配合を用いて、秋田県内の自動車専用道路において実装し、35℃を超える極めて厳しい環境においても十分な施工性とひび割れ抵抗性を有することを明らかとしている。また、実コンクリート舗装内部のコンクリートおよび鉄筋ひずみを計測するとともに、計測データを入力値とした解析モデルを構築し、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コンクリートのひずみ挙動およびひび割れ性状を一定の精度で再現し得ることを示した。なお、これらの検討内容は国内外での学会において発表しており、国内の道路舗装分野における最大規模の学会である日本道路会議においては、その学術性・実用性の高さを評価され、優秀論文賞を受賞している。

さらに、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・改良しており、検証実験の結果を踏まえて目地部を含むコンクリート舗装のモデル化手法・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のみならず、既に実道にまで実装を完了しており、さらに連続鉄筋コンクリート舗装のひび割れ性状を含めた耐久性・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る。これらの成果は、効率的なマネジメントサイクルの構築が強く望まれている道路舗装分野において極め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と膨張材を併用した連続鉄筋コンクリート舗装を実装し、35℃を超える厳しい環境においても問題なく施工が完了した実績は高く評価される。また、事前のプラント実機試験練りおよび試験施工を追加したことで提案するコンクリート舗装の強度発現性や施工性、ひび割れ抵抗性に関するデータ収集を進め、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ひび割れ性状を含めた耐久性が評価可能なモデルを構築している。さらに、東北地方整備局との調整を重ねた上で、次年度においては高耐久コンクリート舗装の手引きを作成する準備も整っており、当初計画以上の進捗と成果が得られているものと判断される。