

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（FS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] コスト構造改革	公募タイプ FS実施
	副テーマ	[副テーマ] 道路資産の保	
③ 研究経費 (単位：万円) ※受託額を記入。	令和3年度 1000万円		
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	
	高橋祐弥	東京大学・講師	
	小松怜史	電力中央研究所・主任研究員	
	前島拓	日本大学・助教	
	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・復興支援道路等に実装してきた。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。FS研究期間では、要素レベルの実験によりフライアッシュコンクリート舗装の基本性能（フレッシュ性状、強度、耐久性）を把握し、これを入力値としたマルチスケール解析のコンクリート舗装への適用性について検証した。

⑥ F S 研究の結果

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

表-1に検討配合を示す。本検討では、水セメント比及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抑制効果、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実験的に検討した。その結果、フライアッシュを混和したコンクリート舗装は、従来の舗装コンクリートと比して凍結防止剤散布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の舗装材料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明らかとした。

表-1 コンクリートの配合

ID	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(C×%)	
			W	C	FA	S	G	AE減水剤	助剤
N40	40	40	160	400	—	706	1079	0.4	0.005
FA40O					80	664	1014		
FA40OI					380	670	1025	0.025	
N45	45	40	160	356	—	721	1102	0.4	0.004
FA45O					71	683	1044		
FA45OI					338	689	1053	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, 数値: 水セメント比, O: 外割(細骨材置換) 20%, OI: 外割 15%, 内割 5%

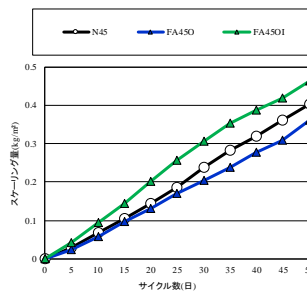


図-1 凍結融解試験結果

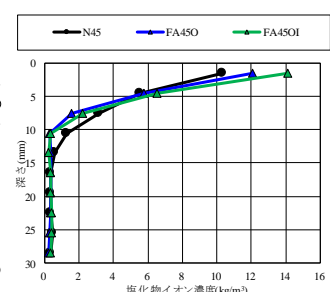


図-2 塩分浸透試験結果

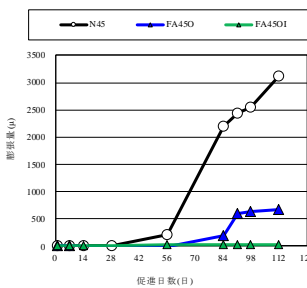


図-3 ASR 促進試験結果

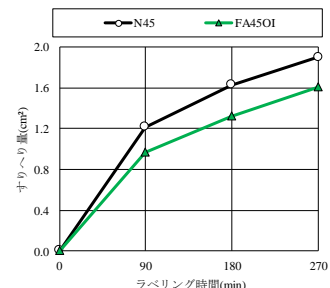
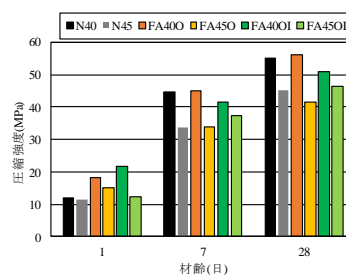


図-4 ラベリング試験結果

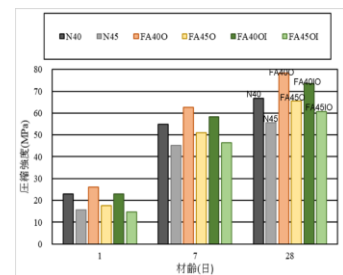
2. フライアッシュを用いた提案配合の

耐久性評価に関する解析的検討

フライアッシュを用いた提案配合について、材料-構造応答連成解析により各種耐久性を評価した。強度増進について実験で得られている傾向を良好に再現することが示された(図-5)。また、コンクリートへの塩分浸透について、浸漬3か月時点の実験結果をおおむね良好に再現することを示すと共に、短期では普通ポルトランドセメント



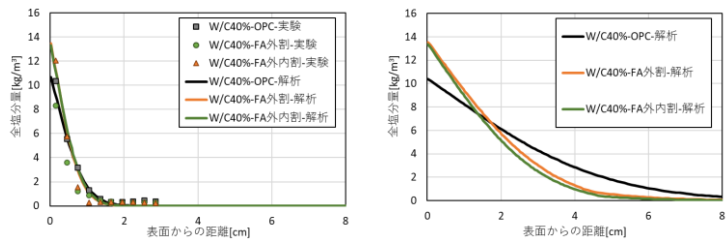
(a) 実験結果



(b) 解析結果

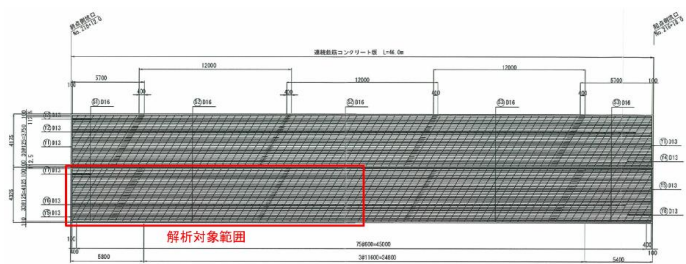
図-5 圧縮強度試験結果

を用いた配合とフライアッシュを用いた提案配合の差異が小さい一方で、長期ではフライアッシュを用いた配合が高い遮塩性能が発揮しうることが示された(図-6)。ASRや凍結融解についても、促進試験の条件を再現した解析を実施し、フライアッシュを用いた配合で十分な耐久性を有していることが示されている。解析的手法を用いることで、短期の実験のみからは評価が難しい長期の耐久性評価を行うことができることが示されており、100年耐久性の定量的な評価の見込みを得ている。また、連続鉄筋コンクリート舗装の設計諸元(図-7(a))を想定して、乾燥収縮体積変化に関する解析を実施した。両端の継ぎ目の拘束などにより、乾燥開始初期より表面に分布するひずみが表れており、実物大スケールの解析により、体積変化によるひび割れリスクを定量的に評価できることが示されている(図-7(b))。

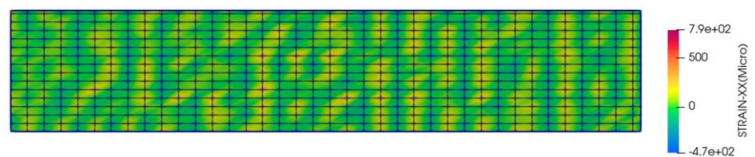


(a) 塩水 3 か月浸漬 (b) 塩水 10 年浸漬

図-6 塩分浸透解析結果



(a) 解析対象の連続鉄筋コンクリート舗装諸元と解析範囲



(b) 材齢 10 日時点の軸直方向直ひずみ分布

図-7 連続鉄筋コンクリート舗装の体積変化解析

3. 目地部とその周辺のせん断疲労破壊挙動とデータ同化による寿命推定

目地を含むコンクリート舗装を模擬して、せん断スパン中にスリットを有する梁の曲げせん断載荷実験を実施し、橋梁床版などで適用可能なデータ同化が目地部にも適用できるかを検討した。配筋の異なる計7ケースの実験を実施した。その結果、実舗装で報告されている目地周辺コンクリートの損傷が実験においても確認され、フープ筋の有無による疲労寿命の延長が認められた。続いて、3次元非線形有限要素解析コード (COM3D) を用いた解析を実施した。

実験結果との比較により、目地を含むコンクリートブロックのせん断疲労損傷と貫通鉄筋の曲げせん断変形を概ね解析可能であることを確認した。さらに疲労履歴を系統的に変化させた解析から、接合部の残留塑性変位

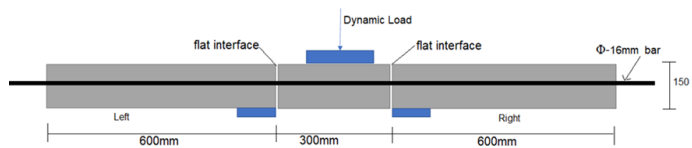


図-8 試験体概要

から、予後の残存疲労寿命をデータ同化によって予想できることを検証できた。

以上はコンクリート舗装単独での事前検証であるが、地盤との相互作用を考慮した実機対応のデータ同化にまで拡張できる見込みを得た。

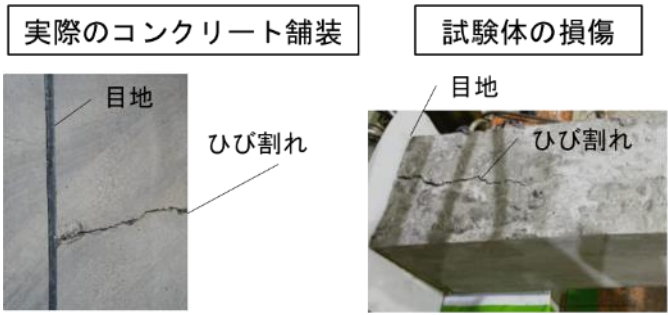


図-9 目地部の損傷状況

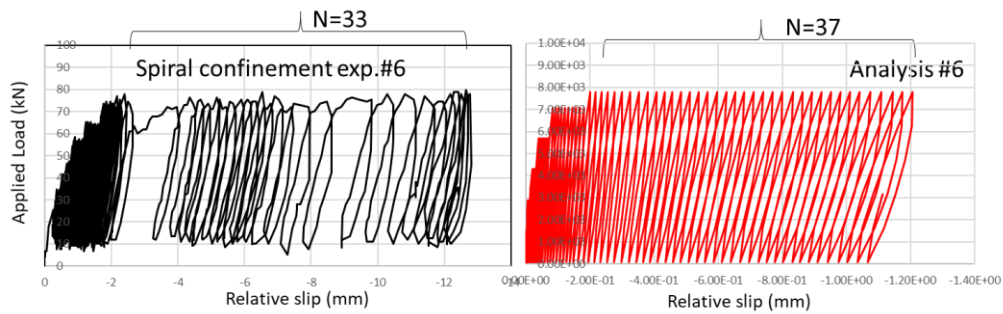
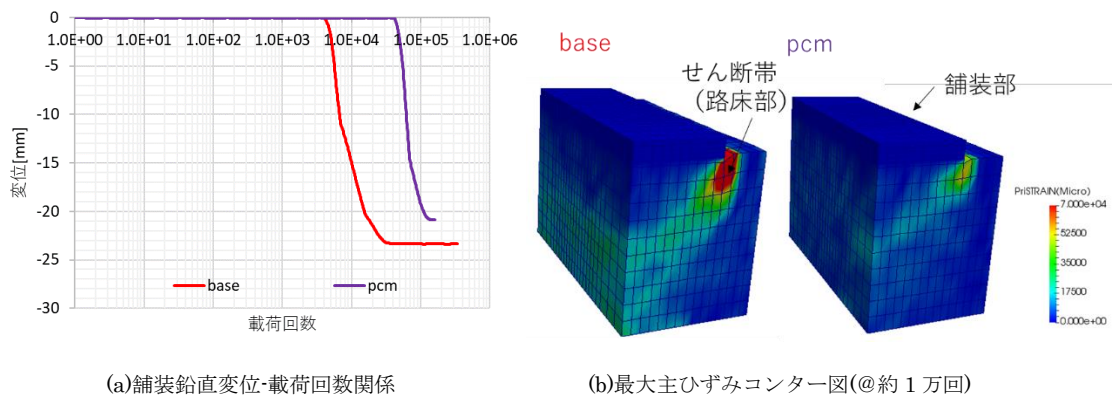


図-10 実験結果と解析結果の比較

4. 縮小コンクリート舗装試験体による地盤-コンクリート連成での疲労挙動解析

縮小コンクリート舗装試験体によるホイールトラッキング試験の事前検討として、数値解析（3次元非線形有限要素解析コードCOM3）を用いて耐疲労性に優れた目地部の構造を検討した。パラメトリックスタディの結果、ポリマーセメントモルタル（PCM）を想定した目地材料を用いることで、路床を含めたコンクリート舗装の耐疲労性が向上する可能性が示された（図-11）。耐疲労性の観点で最適な目地材は、使用するコンクリート舗装と支持地盤（路床・路盤）の力学特性によって異なると考えられる。



(a) 舗装鉛直変位-载荷回数関係

(b) 最大主ひずみコンター図(@約1万回)

図-11 路床+コンクリート舗装の耐疲労性に関する解析的検討

(RD=50%, $\rho=0.01\%$, t=25mm)

さらに、本実験の試験体（目地を有する試験体と目地を有しない試験体の2種類）の構造諸元や使用材料の力学物性を入力した解析モデルを作成（図-12）し、おおよそ妥当な解析モデルを作成することができた（図-13）。

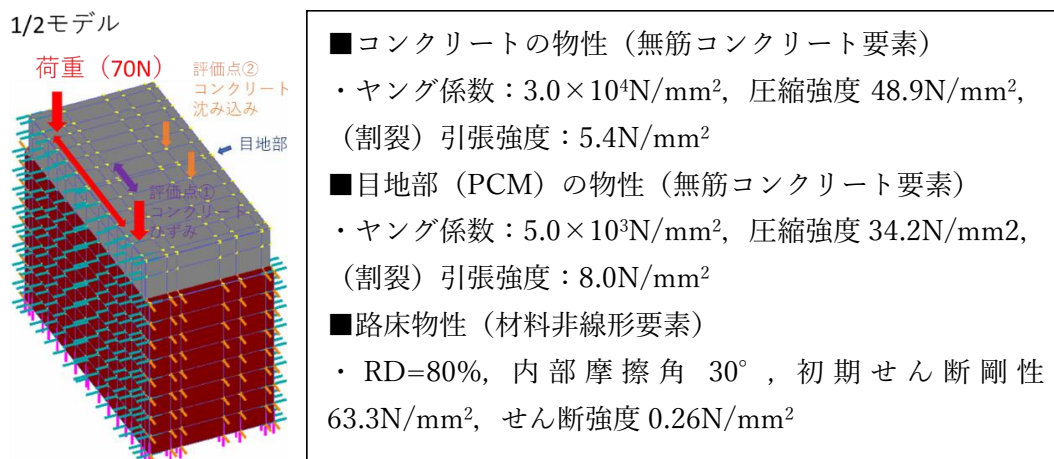
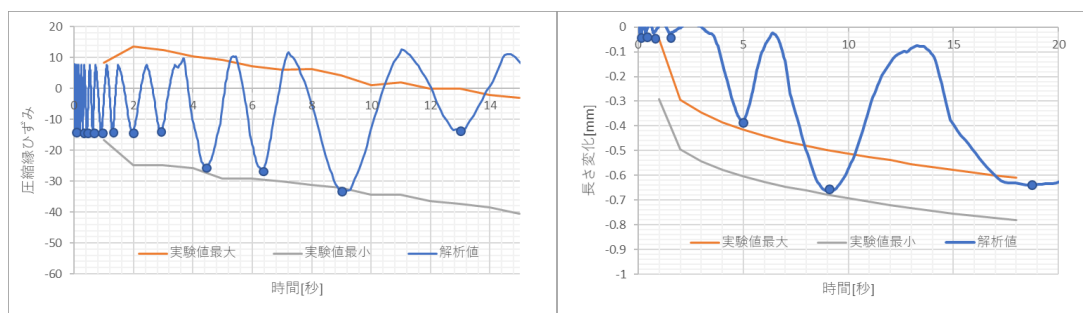


図-12 解析モデルの概要

(RD=50%, $\rho=0.01\%$, $t=25\text{mm}$)



(a)コンクリート舗装の圧縮縁ひずみ-载荷回数の関係

(b)コンクリート舗装の沈み込み-载荷回数関係

図-13 実験値と解析値の比較（@輪荷重中央部通過時，目地無試験体）

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、2022年度以降に東北地整管内でフライアッシュコンクリート舗装の実装の目途が立った。今後は、本研究により得られたデータを基に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実装準備を進める予定である。

また、NEXCO東日本東北支社とコンクリート舗装の劣化事例について議論した結果、連続鉄筋コンクリート舗装については鉄筋位置まで高濃度の塩分が浸透している事例が多々あることが示された。2022年度以降には東北支社と連携して、管内のコンクリート舗装について非破壊検査や開削による詳細調査を実施することとなった。

以上のように本研究では、要素・部材レベルによる実験結果をマルチスケール解析に反映(データ同化)し、提案するコンクリート舗装の耐久性・耐疲労性を評価可能なモデルを構築するとともに、現場実装に向けた調整も順調に進んでおり、当初計画通りに進捗している。

⑦本格研究の見通し

1. フライアッシュを用いたコンクリート舗装の耐久性評価

現状得られている実験結果を解析にて良好に再現できていることから利用モデルの妥当性が示されており、強度増進・耐久性について実際に想定される環境等の条件下での 100 年の長期耐久性評価に進む準備ができている。今後は、日本大学構内においてフライアッシュを用いたコンクリート舗装を敷設し、実環境下での各種ひずみデータを収集するとともに、得られたデータを解析モデルに反映することでモデルの精度向上を図る予定である。

また、連続鉄筋コンクリート舗装の体積変化リスクについて、実物大規模の解析が行えており、開発中の膨張材反応モデルを適用することで、膨張材やフライアッシュを用いた時のリスク低下についても評価が可能な状況にある。本格採択以降は部材レベルにりフライアッシュと膨張材を併用したコンクリートの膨張収縮挙動を評価することで、開発モデルの改良を進める予定である。また、前述した日本大学構内における舗装フィールドにおいてもフライアッシュと膨張材を併用したコンクリート舗装を敷設する予定であり、得られたデータと解析結果を比較することで本解析モデルの妥当性を評価する予定である。

2. 普通コンクリート舗装目地部の耐疲労性評価

今後予定されている他の試験ケースの結果も踏まえ、作成した解析モデルの妥当性の向上を図るとともに、パラメトリックスタディでコンクリート舗装目地部の構造特性を明らかにしていく予定である。また、本格採択以降は日本大学工学部所有の輪荷重走行試験装置および土木研究所所有の舗装走行実験場において疲労試験を実施し、構造体レベルでの耐疲労性について検討する予定であり、ここで得られたデータを解析モデルに反映することでモデルの精度向上を図り、100 年先の耐疲労性について評価可能であると考えている。

3. 現場実装および手引きの作成

前述の通り、2022 年度以降に国土交通省東北地方整備局管内での実装目途が立っている。今後は、路盤・路床を含む実物大舗装構造体モデルを用いた実験と解析により、耐久性及び耐疲労性を評価し、LCC 評価も踏まえて設計供用期間 100 年を満足する高耐久 FA コンクリート舗装を実装し、成果を手引きにまとめた上で国土交通省をはじめとする道路管理者に情報を共有する。

③特記事項

1. 本FS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。現在までにフライアッシュコンクリートの耐久性を解析にて良好に再現できることが示されており、連続鉄筋コンクリート舗装についても膨張材やフライアッシュを用いた際のひび割れリスクについて評価が可能な状況にある。また、普通コンクリート舗装の疲労解析では、目地部を既往の研究で多く用いられている接合面要素ではなく、接合面を含む有体積の固体要素でモデル化している。接合面が多数のレンガ積構造や地盤断層と破砕帯の形成に適用された解析（原子力地中土木構造物）にも実績を有するものであり、技術の統合に繋がる結果が得られつつある。

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る。

2. 研究成果の見通しや進捗の達成度

当初計画通りにフライアッシュの置換率をパラメータとした供試体を作製し、フレッシュ性状、強度、耐久性を実験的に検討するとともに、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、最終審査時において指摘のあった目地部の損傷を含めた検討については、部材レベルの疲労試験結果を基に解析モデルを開発し、地盤-コンクリート連成での疲労挙動解析が可能な段階にある。さらに、道路管理者と調整した結果、当初計画よりも早期に実道試行工事に着手できる目途が立っている。

このように、本研究は当初の計画および審査時に指摘された事項について順調に進捗しており、本格採択以降の準備は整っている。

