

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究終了報告書】

①研究代表者		氏名（ふりがな）		所属		役職	
		岸利治（きしとしはる）		東京大学		教授	
②研究 テーマ	名称	生産性向上とライフサイクルコストの削減に資する膨張材併用軽量床版の研究開発					
	政策 領域	[主領域] 【領域8】 道路資産の保全		公募	Ⅳ		
[副領域] 【領域4】 コスト構造改革		タイプ					
③研究経費（単位：万円）  ※端数切り捨て。 ※該当する研究期間のみご記入 下さい。		平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	総合計	
		—	—	1,365	2,768	4,133	
④研究者氏名		（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。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（※平成31年3月31日現在）					
岩城 一郎		日本大学 工学部 教授					
鎌田 知久		東京大学 生産技術研究所 特任助教					
田嶋 仁志		首都高速道路技術センター 審議役					
白鳥 明		首都高速道路株式会社 技術部技術推進課 課長					
内海 和仁		首都高速道路株式会社 技術部技術推進課 課長代理					
岸田 政彦		首都高速道路株式会社 東京西局プロジェクト本部 プロジェクト設計課 土木設計担当課長					
⑤研究の目的・目標		<p>生産性向上とライフサイクルコストの削減に資する膨張材併用軽量コンクリート床版の研究開発を目的に、膨張材の混和量を調整した膨張材併用軽量コンクリート床版において、輪荷重走行試験による耐疲労性の検討、圧送性に関する試験による施工性の検討および耐凍害性の検討を行い、膨張材併用軽量コンクリート床版のメリットを確実に引き出せるコンクリート仕様と床版の構造細目（床版厚、縦筋等）を明らかにして、生産性向上とコスト削減に資する膨張材併用軽量コンクリート床版を開発することを目標とした。橋梁上部構造の床版に軽量コンクリートを使用することができれば、上部構造の死荷重低減に伴う下部構造の耐震上の負荷軽減効果が極めて大きく、橋梁全体として大幅なコスト削減が期待できる。</p>					

## ⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

### ・これまでの研究経過

	年度ごと研究経緯	名称
H29 年度	膨張材を通常のコンクリートにおける標準量程度使用するだけでケミカルプレストレスを導入することが可能であり、普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有する床版を開発した。	現場汎用性重視上級床版『松』
H30 年度	H29 年度の結果を踏まえ、膨張材量をさらに増やし、ケミカルプレストレスを積極的に導入し、かつ低水セメント比の自己治癒性能も期待できるコンクリートを用いることで、更なる軽量化と高耐久化を図った床版を開発した。	最上級プレミアム床版『松』

上記の 2 タイプの床版の開発にあたっては、以下の 4 つの技術的検討を行った。

- ① 膨張特性の検討（担当：岸田政彦、田嶋仁志、鎌田知久、岸利治）
- ② 圧送性に関する施工性の検討（担当：岸田政彦、田嶋仁志、内海和仁、鎌田知久、岸利治）
- ③ 耐疲労性の検討（担当：岸田政彦、岩城一郎、田嶋仁志、内海和仁、白鳥明、岸利治）
- ④ 耐凍害性の検討（担当：岩城一郎、岸田政彦、岸利治）

### ・目的の達成状況

#### ○現場汎用性重視上級床版『松』の開発

現場打設については、軽量骨材がポンプ打設中の圧力に対し骨材が吸水し、閉塞による打設困難さが課題となっていた。本研究では、年間を通して安定して打設可能な打設方法の研究を行い、汎用的な打設方法を開発し達成できた。膨張材量については、膨張材量が多い場合に、床版鉛直方向に対する過大膨張が課題としてあったが、膨張材量の各種実験、輪荷重走行試験による研究を行い、最適な膨張材量の使用のもと、過大膨張を抑制しつつ、耐疲労性向上に資するケミカルプレストレスの導入によって、普通 RC 床版と同等の耐疲労性を有し、かつ 20%軽量の床版を開発した。

#### ○最上級プレミアム床版『松』の開発

『松』の研究開発の知見を活かし、膨張材量を増やし、ケミカルプレストレス導入による耐疲労性の向上を狙いつつ、床版鉛直方向への過大膨張対策として、床版厚さ方向に拘束鉄筋を組み込む構造を提案。設計的には、ケミカルプレストレス導入によって、床版厚さを普通 RC 床版の 90% (3cm 減少) とした。輪荷重走行試験を行った結果、普通 RC 床版の耐久性を大幅な上回る結果が得られた。また、低水セメント比コンクリート使用により、従来軽量コンクリートでは弱点とされていた凍害防止効果も高められることが凍結融解試験によって確認された。さらに、自己治癒性能が期待できるコンクリートを使用しているため、万が一ひびわれが発生した時には自己補修効果を期待できる。床版厚さ方向に拘束鉄筋への鉄筋の配置は、現場施工において標準的でないため、当面はプレキャスト部材での適用が想定されるが、『松』よりさらに 10%軽量で、高耐久化を図った床版、寒冷地の使用にも耐えうる床版が開発され、当初想定した以上の成果が得られた。

#### ⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

1. 3次元状態のコンクリートの微細構造の疲労による変化が、膨張材、鉄筋による拘束、コンクリートの厚さによる拘束圧効果の影響を受けると考えられることから、膨張材、鉄筋配置、床版厚さによるメカニズムの変化の有無を確認した上で成果を取りまとめていただきたい。

→一般の床版では主鉄筋方向及び配力筋方向の2方向に配置した鉄筋で、水平2方向に対して拘束条件を与えることができ、安定したケミカルプレストレスが得られる。一方、鉛直方向には、通常鉄筋を配置せず、無拘束状態のために鉛直方向に過大な膨張が発生することを試験によって確認した上で、鉛直方向に拘束鉄筋を配置しない『松’』は、標準量の混和にとどめ、ケミカルプレストレスを積極導入した『松』には、鉛直方向に拘束鉄筋を配置するディティールを提案した。

2. 膨張材添加量の異なる3段階の各メニューをどの様に使い分けるのかの具体的な内容まで研究成果として示していただきたい。

→膨張材量としては、既に今ある技術として首都高速の高架橋の床版で30年間以上の健全性な状態を保っている膨張材を混和しない床版『梅』があるが、これに追加して、本研究で開発した2タイプの床版を新たにラインナップされた。床版『松’』は、標準膨張材量で現場汎用性を重視、床版『松』は、膨張材量をさらに増やし、積極的にケミカルプレストレスを導入し、更なる軽量化と高い耐久性を有する。

→耐用期間100年を想定し、輪荷重走行試験結果を参考に、『松』および『松’』の適用範囲について検討を実施した。

3. 開発された製品の適用により、どれだけのコストメリットが生じるのかについて検討していただきたい。

→『松』および『松’』を適用した場合のコストメリットの試算を実施した。

4. 成果の首都高以外の道路への汎用性に向けての対応方針を明らかにして頂きたい。

→2.にも記載したが、『松’』についてはだれでも施工可能な技術を確立したことからどの現場へも汎用的に適用可能と考えられる。『松』については、工期短縮、さらなる軽量化が求められる床版更新現場等への適用の他、首都高速の立地条件では想定していない寒冷地への適用についても可能と判断される。

5. 経費の大半を占めている外注費の削減が必要であり、例えば疲労試験の効率的な実施について検討していただきたい。

→外注する際には、見積書に対して精査を実施した上で、契約を行った。

### ③研究成果

開発した『松’』及び『松』の2タイプの床版について、検討成果を示す。

#### (1) 『松’』 (現場汎用性重視上級床版)

一般に外気温が高い夏季は、膨張材の混和の量によっては、過大な膨張が発生することが懸念される。そこで、膨張材混和量をパラメータとした膨張特性試験を実施した。その結果を図-1に示す。夏季に標準量以上の混和した場合、無拘束状態の鉛直方向のコンクリートひずみは、非常に大きな値となった。一方、標準量程度の混和であっても、橋軸方向及び橋軸直角方向には、圧縮力が導入されることがわかる。以上の結果などを踏まえて、無拘束状態での鉛直方向ひずみが1000 $\mu$ 以下となることを目安として、膨張材の混和量は20kg/m<sup>3</sup>とした。決定した配合を表-1に示す。

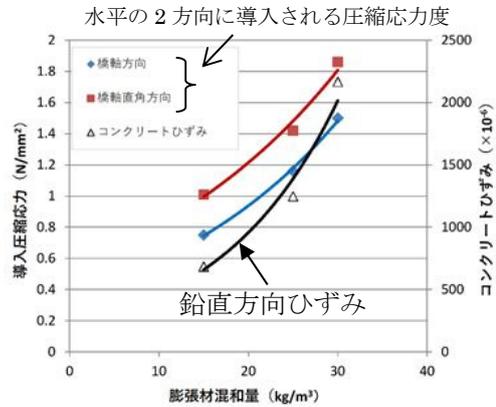


図-1 膨張材混和量と導入圧縮応力および鉛直方向のコンクリートひずみの関係

普通ポルトランドセメントを用いて、粗骨材、細骨材とも人工軽量骨材の軽量コンクリート2種とした。膨張材はエトリンガイト・石灰複合系の低添加型膨張材を使用、W/Pは37%とした。決定した配合について、施工性、耐疲労性、耐凍害性を検討して結果を、1)~3)に示す。

表-1 『松’』の配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AD*2 (P×%)	AE*3 (P×%)
		W	C	Ex*1	SL	GL		
37	48.6	170	439	20	513	424	1.1	0.001

\*1:低添加型膨張材 \*2:AE減水剤標準型 (I種) \*3:AE剤 (I種)

#### 1) 圧送性確保のための検討

単位水量の少ない土木用の配合で軽量コンクリートをポンプ圧送により確実に施工する技術を構築した。既往の研究により軽量コンクリートの圧送性を低下させる原因を、内部が水に接触していないセメント粒子の強凝集体が残存することと考えた。これらを加味して、実施工において、圧送管の筒先で打設可能なフレッシュ性状を安定して保つことができる最小の単位水量について、混和剤仕様など含めて検討した。夏季と冬季の両方でポンプ圧送試験を実施した結果、



写真-1 圧送性試験の状況

最小の単位水量 (W=165kg/m<sup>3</sup>) からわずか+5kg/m<sup>3</sup>のW=170kg/m<sup>3</sup>とすることによって、耐久性等に影響することなく安定して圧送できることを確認し打設性に対する汎用性を確保できた。

(写真-1)。この開発の過程において、圧送性の低下のメカニズムにまで踏み込んで検討を行い、現在、JSCEが提案している「加圧ブリーディング試験におけるポンパビリティーが良好である条件」をブラッシュアップし、ブリーディング試験から得られるブリーディング率と加圧ブリーディング試験から得られる最終脱水率による軽量コンクリートの圧送性指標を提示した (図-2)。なお、図の圧送可能ラインは、今後もデータの蓄積により、ブラッシュアップが期待される。

## 2)耐疲労性に関する検討

膨張材併用軽量コンクリートを用いて膨張ひずみについて検討した結果、必要なケミカルプレストレス量を導入するために必要な膨張材量を把握することができた。まずは、標準混和量を混和すれば、鉛直方向へ膨張を抑えつつ、橋軸方向及び橋軸直角方向の2方向に、ケミカルプレストレスが導入できるひずみが発生していることを確認した(表-2)。膨張材を標準混和量混和した膨張材併用軽量床版を用いて耐疲労性の検討を行った結果、道路橋示方書で設計した普通コンクリート床版の耐疲労性と同等以上であることを確認した(図-3)。『松』は、軽量RC-20を示し、過去に土木研究所が実施した普通RC床版の輪荷重走行試験Cの供試体RC8n-1とRC8n-2の間に位置している。

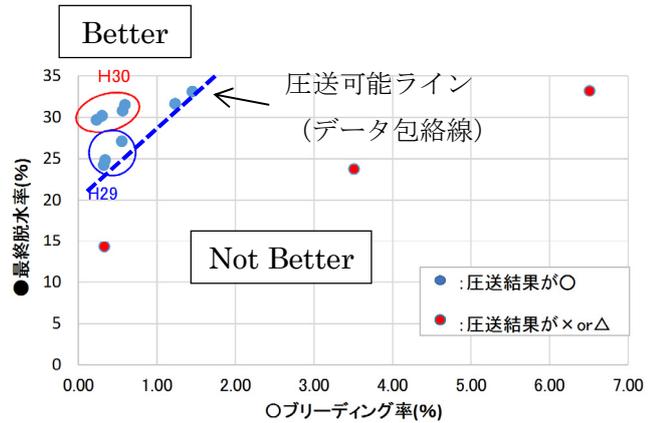


図-2 圧送性指標

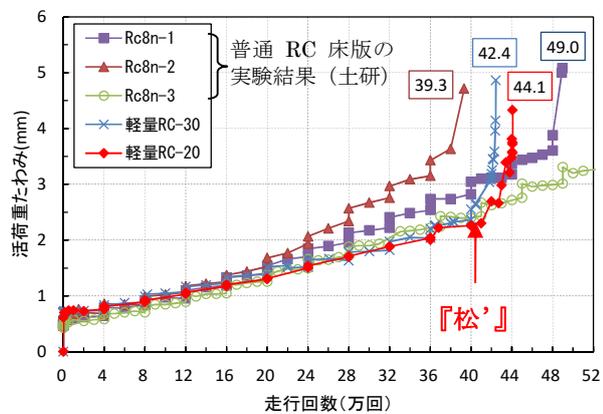


図-3 輪荷重走行試験結果

## 3)耐凍害性に関する検討

JISによる凍結融解試験を実施した結果、普通コンクリートとは違い軽量コンクリート2種では、空気量の増加による耐凍害性の改善は認められず、軽量粗骨材と軽量細骨材の骨材中の飽水度を下げ、凍結に伴う膨張圧を抑制することで、耐凍害性が改善することを確認した(図-4)。

以上の検討結果から、『松』は、普通RC床版と同程度の耐疲労性を有する現場打ちコンクリート床版であり、後述する『松』に比べると施工費が安価であり、汎用的材料として、軽量コンクリートを活用による軽量化をもって、上下部工の製作・施工コストを低減する技術である。

表-2 供試体に生じたコンクリートひずみ (μ)

	主筋方向	配力筋方向	鉛直方向
材齢7日	300	360	740

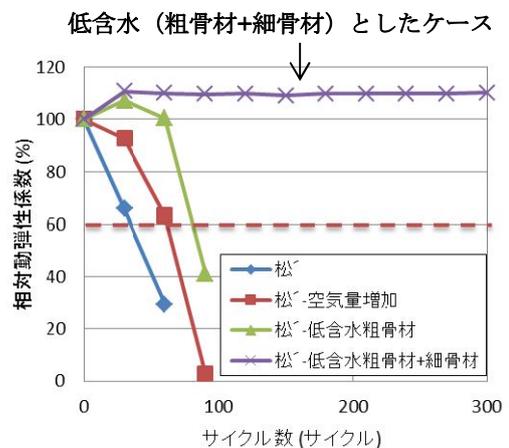


図-4 凍結融解試験結果

## (2) 『松』 (最上級プレミアム床版)

『松』の研究開発の知見を活かし、『松』は、以下のコンセプトで開発した。

- ▶ 標準混和量の1.5倍の混和で、ケミカルプレストレスを有効に働かせ、平成29年度に実施した膨張材併用軽量床版よりも、耐疲労性の高い床版を開発する。
- ▶ 膨張材混和量を増加させるため、鉛直方向への拘束のための鉄筋を配置する。現場での鉄筋加工・組立ては標準ではないため、当面プレキャスト部材で取り扱う(写真-2)。
- ▶ 養生方法は、蒸気養生を行った。
- ▶ 床版厚は、RC8床版シリーズと比べて3cm小さくし、22cmとする。(ケミカルプレストレインを考慮した設計により決定。22cmはループ接手厚さを考慮)
- ▶ W/Cを低減させて、自己治癒性能・耐凍害性能を保有させる。
- ▶ 検討した配合を表-3に示す。



写真-2 供試体作成状況

表-3 『松』の配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AD* <sup>2</sup> (P×%)	AE (P×%)
		W	C	Ex* <sup>1</sup>	SL	GL		
25.8	48.5	155	555	45	549	520	5.1	—

\*1:30型膨張材 \*2:高性能AE減水剤

### 1)耐疲労性に関する検討

膨張材を標準混和量の1.5倍混和した場合には、床版の厚さ方向に大きな膨張ひずみが発生することと床版の厚さ方向に鉄筋を配置すれば大きな膨張ひずみが抑制できることを確認した。

その結果、『松』として膨張材を標準混和量の1.5倍混和した膨張材併用軽量床版の場合は、床版厚さを薄くして床版厚さ方向に鉄筋を配置すれば、道路橋示方書で設計した普通コンクリート床版の耐疲労性以上の耐疲労性があることを確認した(図-5)。「松」は、軽量RC-45を示し、土木研究所の階段載荷方式において、高耐久とされる回数52万回を上回った。

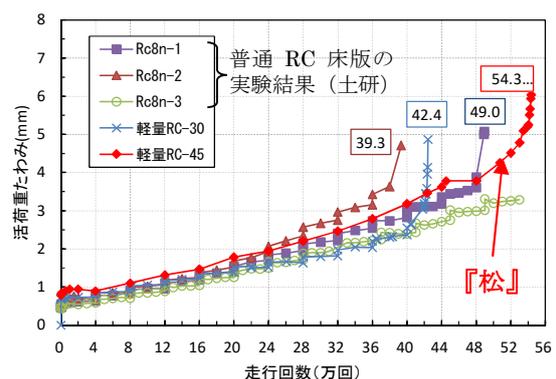


図-5 輪荷重走行試験結果

### 2)耐凍害性に関する検討

膨張材併用軽量床版を用いて凍結融解試験を実施した結果、普通コンクリートとは違い軽量コンクリート2種では、空気量の増加による耐凍害性の改善は認められず、水分を含む通常の軽量細骨

材を用いても、軽量粗骨材が低含水状態であれば、軽量細骨材中の水分が自己乾燥状態にあるペースト部に供給されることで、軽量細骨材の含水率が低下し、耐凍害性が改善することを凍結融解試験結果から明らかにした（図-6）。

以上の検討結果を踏まえ、『松』は、膨張材を、収縮補償程度を超えた混和と、鉛直方向への拘束鉄筋配置のマッチングによってもたらされた3次元ケミカルプレストレス効果によって、普通RC床版に対して、厚さが3cm小さく製作された床版であっても、普通RC床版を上回る耐疲労性を有する。用途としては、軽量コンクリートの活用による軽量化による上下部工の製作・施工コストを低減する目的で使用するにとどまらず、下部工・基礎工に対して荷重の制限が厳しい箇所、既設床版が軽量床版で施工されている箇所、1971（昭和46）年以前の基準で床版厚が薄い箇所の床版取替えなどの更新事業においてに貢献できる技術である。また、従来、寒冷地では適用が困難であった軽量コンクリートの適用を実現させた。

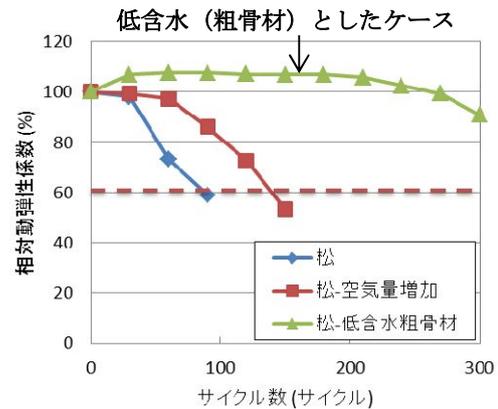


図-6 凍結融解試験結果

(3) 試設計

『松』及び『松』のコスト削減効果について、試設計を実施し、従来の床版形式を用いた場合（第1案）との比較を行った結果を図-7に示す。『松』は、従来形式の最も安価な案に対して約3%のコストが削減される。更に、『松』を採用した場合、従来形式の最も安価な案に対して約7%のコスト削減となった。

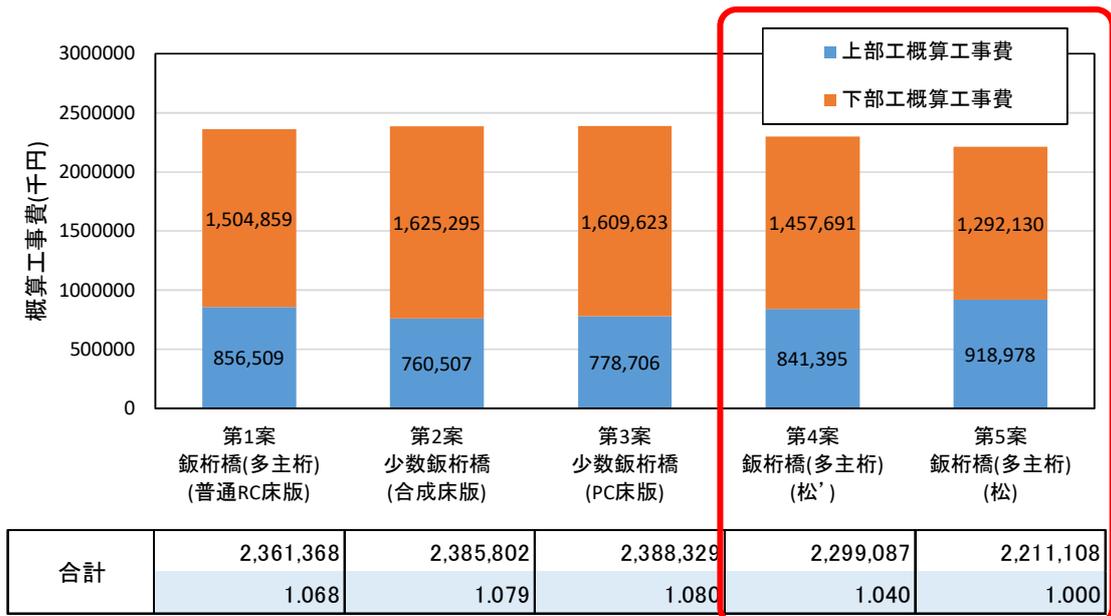


図-7 試設計によるコスト削減効果の検証

### ⑨研究成果の発表状況

#### 1. 圧送性に関する検討

内海和仁、岸田政彦、田中伸幸、村松達也、岸利治、鎌田知久：年間を通して圧送可能な軽量コンクリート2種の配合検討，土木学会年次講演会2019

#### 2. 耐疲労性に関する検討

岸田政彦、田嶋仁志、北村耕一、岸利治：膨張材を混和した軽量RC床版の耐疲労性に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.41、No.2、2019、pp715-720(2019)

### ⑩研究成果の社会への情報発信

査読付き論文への投稿や、国内外の学会発表などに積極的に参加し、研究成果を継続的に発信している。

### ⑪研究の今後の課題・展望等

膨張材併用軽量コンクリート床版タイプとして『松’』『松』を開発し、それぞれの圧送性と耐疲労性等に関する課題は解決済みであり、本研究は大きく前進した。

このため、より汎用性が高まったことから開発主体である首都高のみならず、全国への展開が期待される。

今後の研究の展望としては、首都高速道路内においては、パイロット工事等を計画し、実施可能であれば、必要に応じて、施工データ収集等を行う。本技術は全国的に適用可能と判断されるため、コスト縮減に資する新技術として全国展開を図るために、橋梁形式の選定段階で比較案に挙がるよう、橋梁設計エンジニア（事業者、建設コンサルタント協会など）にPR活動（NETISへの登録、新技術の審査証明を含む）を実施する。

なお、今回「松」は、鉛直鉄筋の配置の作業性を考慮して、プレキャスト工場での製作の対応としたが、将来的には現場打ち施工とも対応できるように、鉛直方向への拘束の容易性に着目したディティールの開発も行っていきたい。

また、本技術の海外への展開も可能ではないかと考えている。床版へのケミカルプレストレスの導入は、膨張材を混和するだけの追加作業で実施でき、機械式のプレストレスと比較すると高度な品質管理を必要としないため、「軽量骨材」、「膨張材」が手配できれば、海外でも容易に高耐久な床版を製作できる。なお、国内で製作したプレキャスト製品を海外へ輸出する場合でも、製品が軽量であることから、輸送コストは安く抑えられる。

### ⑫研究成果の道路行政への反映

本技術の適用した場合、軽量化による上部工鋼桁及び下部工・基礎工がコンパクトになることによって生まれるコスト縮減効果に加え、下部構造に対して荷重の制限が厳しい箇所や既設床版が軽量床版で施工されている箇所、また、1971（昭和46）年以前の基準で床版厚が薄い箇所の大規模更新、大規模修繕に貢献できる。さらに、昨今「国土強靱化（ナショナル・レジリエンス）」が推進される中、大規模地震への震災対策として、床版の死荷重の低減効果（「松’」においては2割減、「松」においては3割減）を有用に活用することで、実質的に補強工事が困難な既設の基礎構造物の耐震性の向上を図ることができる。

また、「松」は、その製作において、特殊な技術が必要とされる緊張作業を用いないため、鉄筋コンクリートが扱えるプレキャスト工場で対応が可能であり、製品生産を短期間に大量に行えるメリットは、そのまま、生産性の向上と現場工期短縮につながる。

なお、「松’」、「松」は、試算によると、従来形式の床版を用いた場合のコストからそれぞれ3%、7%の縮減が期待されることから、この新技術の活用促進を図ることで、道路行政の質の向上に大いに貢献できる。

### ⑬自己評価

汎用性を重視した膨張材併用軽量コンクリート床版である「松'」と、鉛直方向への拘束鉄筋配置と収縮補償を超えた膨張材使用の組合せによる3次元ケミカルプレストレス効果によって、普通RC床版よりも厚さを3cm薄くしつつも普通RC床版を上回る耐疲労性を実現した最上級プレミアム床版である「松」を開発し、さらに、現場施工におけるコンクリート圧送の要件と凍結融解抵抗性を確保するための方策を明らかにしており、研究目的の達成度は十分であると考えている。

本技術を適用すれば、軽量化による上部工鋼桁及び下部工・基礎工がコンパクトになることによって生まれる新設構造物におけるコスト縮減効果に加えて、下部構造に対しての荷重制限が厳しい箇所や既設床版が軽量床版で施工されている箇所、および1971（昭和46）年以前の基準で床版厚が薄い箇所などの既設構造物の大規模更新・大規模修繕にも貢献できる。さらに、大規模地震への震災対策として、床版の死荷重の低減効果（「松'」で2割減、「松」で3割減）を有効に活用することで、基礎の補強工事が困難な既設構造物の耐震性向上を図ることもできる。このように、本技術が実用化されることによる道路政策の質の向上への寄与は極めて大きいと考えている。

研究成果の新規性および有用性における秀逸さのみならず、本研究の遂行に合わせて、首都高速道路株式会社が独自に用意したほぼ同額の共同研究費をマッチングファンド的に活用した外枠での研究も行っており、本研究に対する研究費の投資価値は相当に高いと考えている。