

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
	山口 栄輝 (やまぐち えいき)		九州工業大学大学院 建設社会工学研究系	教授 (Ph.D.)
②研究 テーマ	名称	高性能鋳鉄床版の開発		
	政策 領域	[主領域] 政策領域8 : 道路資産の保全 [副領域] -	公募 タイプ	タイプII: 技術的課題の画 期的な解決を目指す研究
③研究経費 (単位: 万円)	平成27年度	平成28年度	平成29年度	総合計
	1777万円 (除く, 平成26年度FS 採択時: 433万円)	1119万円	364万円	3693万円 (平成26年度含む)
※端数切り捨て。				
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30年3月31日現在)			
三木 千壽	東京都市大学・学長			
恵良 秀則	九州工業大学・教授			
大城 桂作	日之出水道機器株式会社・R&D総合センター顧問			
聖生 守雄	日之出水道機器株式会社・技師長			
笠原 一浩	日之出水道機器株式会社・土木MKT課長			
村山 稔	日之出水道機器株式会社・土木MKTマネージャー			
飛永 浩伸	日之出水道機器株式会社・技術開発マネージャー			
梅谷 拓郎	日之出水道機器株式会社・研究開発マネージャー			

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

日本の橋梁は経年による老朽化が進んでいる。特に採用実績の多い RC 床版は劣化が著しく更新の必要性が指摘されているが、古い橋梁の橋脚および基礎は耐震性が不十分なものが多く、同じ RC 床版で更新することには問題がある。一方、鋼床版は RC 床版と比較して重量が軽く耐震性の向上を図れる等のメリットを有するが、溶接部に疲労損傷を発生しやすいことが問題となっており、問題解決のためには、軽量でかつ疲労耐久性の高い床版の開発が必要となっている。

ここに新たな床版材料として提案する球状黒鉛鋳鉄は、普通鋼と同等の性能を有する材料である。「鋳造」は複雑な形状を一体成形できるという特徴を有し、溶接が不要となる。加えて部材コーナー部などでの応力集中を、板の増厚や丸み付け (R化) により緩和できるため、高い疲労耐久性が期待できる。また、コーナーR化は塗装耐久性の向上にも寄与する。さらに、同じ形状のものを繰り返し製造することが可能であり、標準化等でロットを大きくすることにより大幅なコスト削減が可能となる。

本研究は、このような鋳鉄の特性を活かし、疲労耐久性に優れ、橋梁の耐震性を向上させ、かつ経済的な鋼製 (鋳鉄) 床版を実現することを目的とする。

⑥ これまでの研究経過・目的の達成状況

(研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等 (外注を実施している場合は、その役割等も含めて) について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。)

●平成26年度 (FS採択)

本格採択に向けた条件「球状黒鉛鋳鉄による鋼床版の小規模な試作製造を行い、応力特性・耐久性・品質などを評価」に対し、以下の研究を実施。

- 1) 試設計と経済性の評価
- 2) 球状黒鉛鋳鉄による実大鋳鉄床版の試作
- 3) 試作品切り出しによる部位毎の機械的性質の評価
- 4) 試作品切り出しによる鋳肌鋳鉄の疲労性能評価
- 5) 試作品の静荷重試験
- 6) 試作品の疲労試験

上記1) ~6) の研究の結果、以下の成果を達成した。

- ・実大鋳鉄床版の製造は可能 (図1)



図1 鋳鉄床版試作品 (1250mm × 2500mm)

- ・実体から切り出した各部位の機械的性質は要求性能を満足
- ・実体から切り出した鋳肌試験体の疲労試験結果は、大型薄肉であるにもかかわらず、既往の文献通りの性能を有し、溶接部と比べ極めて優れた疲労性能を有する（図2）
- ・静荷重試験結果はFEM解析と一致し変形や応力は解析で予測可能
- ・設計用許容応力度が発生する振幅荷重を用いた疲労試験において、400万回後にも全く疲労亀裂が発生しない（図3，図4）

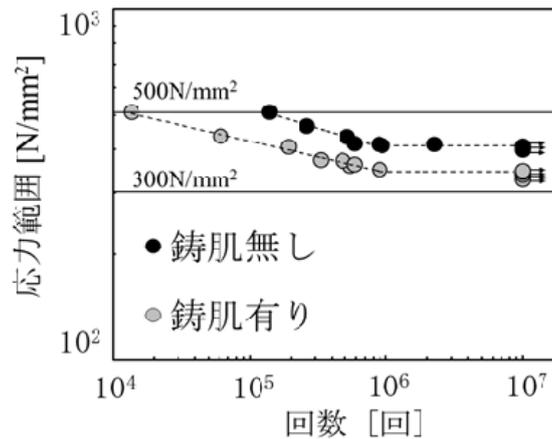


図2 鋳肌付き試験片 片振り3点曲げ疲労曲線



図3 定点繰返し載荷試験

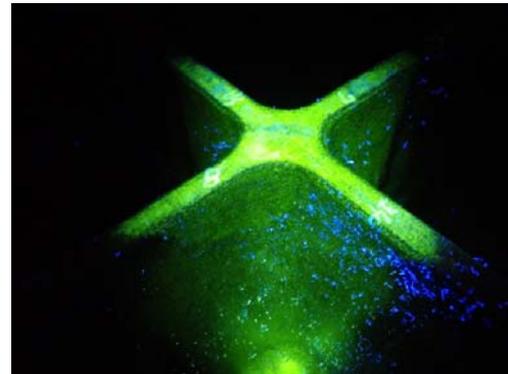


図4 定点繰返し載荷試験後のリブ磁粉探傷結果

●平成27年度（本格採択／1年目）

本格採択の1年目として、以下の研究を実施。なお、ここで言う最適化は最小重量のことである。

- 1) 鋳鉄床版の最適形状の開発
- 2) 力学性能の検証と評価
 - ・終局強度特性確認のための静的載荷試験の実施
 - ・床版の疲労性能確認のための疲労試験の実施
- 3) 接合部の設計と性能検証
- 4) 舗装耐久性および止水性の検証
- 5) 最適鋳鉄材料の選定と量産に向けた鋳造プロセスの確立

前記1) ~5) の研究の結果、以下の成果を達成した。

- ・ 鋳鉄床版のリブ配置、リブ断面等の最適化を完了 (図5, 図6)
- ・ 静的弾塑性載荷実験とき裂発生疲労実験を行い、鋳鉄床版は十分な力学性能を有することを確認 (図7, 図8)
- ・ 接合部のすべり係数を把握し、道路橋示方書に準拠した高力ボルト摩擦接合が可能であることを確認 (表1)
- ・ 鋳鉄床版の製造過程の組織制御技術を確立し、安定した品質の床版の量産製造に目途を付けた

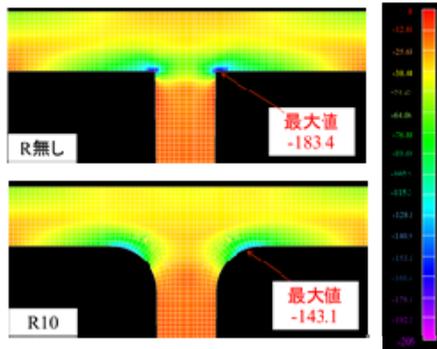


図5 デッキプレートと副リブ交差部のFEM解析

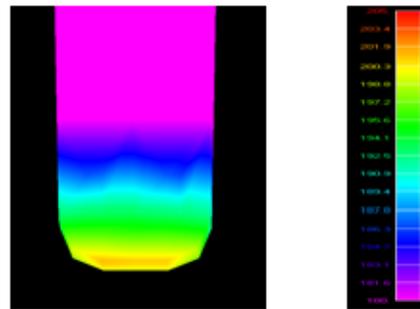


図6 リブ下端部コーナーRのFEM解析



図7 静的載荷試験 (941kN載荷時)

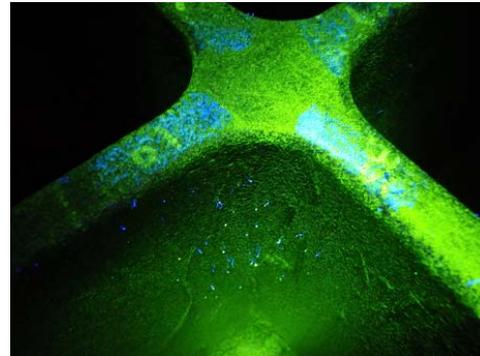


図8 静的載荷試験後のリブ磁粉探傷結果

表1 すべり係数測定結果

試験体	ばい軸力			軸力低下率				すべり荷重		すべり係数			標準偏差	変動係数
	軸行時	試験前	すべり時	試験前	試験後	すべり時	すべり時	P	P/200kN		P/N _v			
	軸力N ₀	軸力N ₁	軸力N ₂						平均	平均	平均	平均		
SF2	225.0	207.7	197.0	7.9	7.7	4.8	4.9	431.1	0.53	0.49	0.52	0.48	0.038	0.078
	226.0	209.0	199.7	7.5		4.7		398.5	0.49		0.48			
	225.7	208.4	197.2	7.7		5.4		349.1	0.43		0.42			
	226.7	209.2	199.5	7.7		4.7		391.7	0.48		0.47			
	225.9	208.8	198.2	7.8		5.1		435.0	0.53		0.52			
SF3	225.0	208.0	197.9	7.8	8.2	4.8	6.4	427.2	0.52	0.55	0.51	0.55	0.033	0.080
	226.1	209.9	198.4	8.0		5.3		438.0	0.54		0.52			
	226.0	209.3	198.5	8.4		5.2		488.4	0.57		0.56			
	226.1	207.2	194.4	8.3		8.2		436.3	0.53		0.53			
	226.0	207.2	195.9	8.3		5.3		488.4	0.61		0.60			
FF3	226.3	208.1	198.3	8.1	7.4	4.7	4.7	358.1	0.44	0.46	0.43	0.45	0.022	0.050
	226.9	211.9	202.2	7.4		4.6		354.5	0.43		0.42			
	226.3	208.4	198.2	7.5		5.3		398.0	0.49		0.48			
	225.9	208.4	198.0	7.3		5.2		391.0	0.48		0.47			
	226.0	210.8	203.2	8.7		3.8		388.5	0.47		0.48			

●平成28年度（本格採択／2年目）

本格採択の2年目として，以下の研究を実施．なお，ここで言う最適化は最小重量のことである．

- 1) 鋳鉄床版の最適形状の開発
- 2) 鋳鉄床版の新しい接合構造の開発
- 3) 鋳鉄床版の力学性能の検証
- 4) 品質管理項目と検査方法の検討
- 5) 鋳鉄床版の適用性の検証

上記1)～5)の研究の結果，以下の成果を達成した．

- ・鋳鉄床版の副リブ間隔と副リブ・主リブ断面，曲率半径Rの最適化を完了（表2）
- ・集中荷重による落錘衝撃試験を行い，鋳鉄床版の破壊モードは，衝撃エネルギーが入力された部分から一気にき裂が進展し破断に至るものではなく，限定された範囲内でのき裂発生と破壊に留まることを確認（図9）
- ・鋳肌のある鋳鉄床版の表面クラック，内部欠陥の非破壊検査方法として，磁粉探傷試験，フェーズドアレイ超音波探傷試験の適用性を確認

表2 コーナーR最適化結果

副リブ 間隔X(mm) 本数【Nx】	R8	R9	R10
	最小主応力 (N/mm ²)	最小主応力 (N/mm ²)	最小主応力 (N/mm ²)
218.2 【12】	-212	-185.9	-160.9



図9 落錘衝撃試験結果

- ・ 輪荷重157kN（鉄輪）での輪荷重走行試験を行い、70万往復（140万回）の途中経過ではあるが、 鑄鉄床版主要部に発生するひずみや床版下面のたわみなどの挙動は安定しており、 疲労破壊に至る傾向は観察されないことを確認（図10， 図11）
- ・ これまでの研究/開発成果に基づき鑄鉄床版の実橋適用性について従来型床版との比較検証を行ったが、 実工事における車線規制など種々の施工条件の設定が課題であることが分かった（表3）



図10 輪荷重走行試験（157kN×200万回）

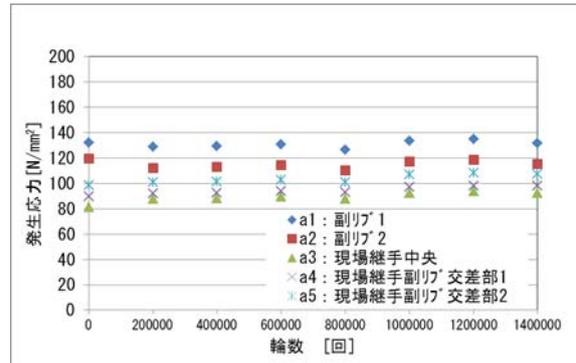


図11 輪荷重走行試験結果（発生応力）

表3 従来型床版と鑄鉄床版との適用性比較一覧

タイプ	従来型床版			鑄鉄床版	
	RC床版	鋼・コンクリート合成床版	プレキャストPC床版		
イメージ					
特徴	疲労耐久性	△ ・旧基準で設計された床版は厚みが薄く耐久性が低い	○ ・PC床版と同等以上	○ ・輪荷重約300kNで50万回程度で破壊(第2回道路橋床版シンポジウム講演論文集より) ・1000万回載荷の疲労試験にてき裂発生せず(定点繰返し)	
	軽量化	× ・500kg/m2 (床版厚200mm)	× ・440kg/m2 (床版厚160mm)	△ ・330kg/m2 (床版厚160mm) ○ ・270kg/m2 (デッキ厚13mm)	
	急速施工性	× ・現場製作のため、現場工期が長い	× ・現場製作のため、現場工期が長い	△ ・プレキャスト構造のため、現場製作がなくRC/鋼・コンクリート合成床版と比べ、現場工期の短縮が可能	△ ・部品点数が多く、現場施工性は悪いものの、他工法で使用されるモールド打設がないボルト締結工法により打設/養生期間が不要、架設支持(バント)が不要であることから1~2日の工期短縮が見込める
	コスト	○ ・床版費用は最も安価で、桁補強量が多いものの全体工費は安価に納まっている	○ ・RC床版より高価で、桁補強量も同等量必要	○ ・RC/鋼・コンクリート合成床版に比べると高価	△ ・接合面の機械加工、接合部のボルト/添接板など部品点数が多いことから床版価格は高価 ・仮設支持(バント)が不要
	部分取替	-	-	-	○ ・部分的な取替が可能
	塗装メンテナンス性	○ ・発錆がなくメンテナンス小	○ ・メッキ処理による発錆対策によりメンテナンス小	○ ・発錆がなくメンテナンス小	△ ・発錆による定期的メンテナンス要
	その他	- ・現行の設計基準で設計すると床版厚が厚くなり重量が増す ・死荷重増による橋脚再補強が必要な場合がある	- ・死荷重増加による橋脚照査が必要な場合がある ・コンクリートクラックによる「滞水」が課題	- ・継手部が弱点(配筋, 50Nコン, 欠損) ・最も一般的に使用されている形式 ・プレキャスト(工場)のため、品質が安定	- ・バネの直線性に難点 ・曲線, 拡幅対応すると多品種少量生産となるため、部分的に鋼製とのハイブリッド構造を検討中 ・主桁上フランジ上面のस्टッドボルト仕上精度に課題

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間・FS評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

●FS評価 (H26年度)

<指摘事項>

- ・球状黒鉛鋳鉄による鋼床版の小規模な試作製造を行い、応力特性・耐久性・品質などに問題ないことを示すこと

<対応状況>

- ・1) 試設計と経済性の評価, 2) 球状黒鉛鋳鉄による実大鋳鉄床版の試作, 3) 試作品切り出しによる部位毎の機械的性質の評価, 4) 試作品切り出しによる鋳肌鋳鉄の疲労性能評価, 5) 試作品の静荷重試験, 試作品の疲労試験を行い, 鋳鉄床版は安全性耐久性において優れた特性を有することを報告

●中間評価 (H27年度)

<指摘事項>

- ・多様な橋梁構造や床組み構造との組み合わせに対して, 適用範囲の拡大が見込めるように, できるだけ汎用性のある知見としてのとりまとめが期待される
- ・製造コストが課題であるため, ライスサイクルコスト等の観点から優位性を示すとともに, 疲労耐久性能を明らかにし, 試験的にでも実橋梁への展開を進めていただきたい

<対応状況>

- ・1) 鋳鉄床版の最適形状の開発, 2) 鋳鉄床版の変形性能の確認, 3) 鋳鉄床版の疲労性能の確認, 4) 鋳鉄のすべり係数測定と接合構造の開発, 5) 活荷重による鋳鉄床版および接合部の変形性能の確認, 6) 最適鋳鉄材料の選定と量産に向けた鋳造プロセスの確立を実施し, 当初計画に掲げた研究目的と目標を概ね順調に達成

●中間評価 (H28年度)

<指摘事項>

- ・コスト面, 適用性, 他の床版構造に対する優位性などを含めた総合的な評価が必要
- ・軽量化に伴う優位性など, 耐震性などを含めた構造の最適化について整理が必要

<対応状況>

- ・1) 鋳鉄床版の副リブ間隔と副リブ・主リブ断面, 曲率半径 R の最適化を完了, 2) 落錘衝撃試験を行い, 鋳鉄床版の破壊モードは一気にき裂が進展し破断に至るものではなく, 限定された範囲内でのき裂発生と破壊に留まることを確認, 3) 輪荷重 157kN (鉄輪) での輪荷重走行試験を行い, 70 万往復 (140 万回) の途中経過ではあるが, 鋳鉄床版主要部に発生するひずみや床版下面のたわみなどの挙動は安定しており, 疲労破壊に至る傾向は観察されないことを確認, 4) 鋳肌のある鋳鉄床版の表面クラック, 内部欠陥の非破壊検査方法として, 磁粉探傷試験, フェーズドアレイ超音波探傷試験の適用性を確認, 5) これまでの研究/開発成果に基づき鋳鉄床版の実橋適用性について従来型床版との比較検証を行ったが, 実工事における車線規制など種々の施工条件の設定が課題であることが分かり, 研究計画に掲げた研究目標は, ほぼ順調に達成

⑨研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

<設計／構造>

- ・FEM解析により、鋳鉄床版の構造は、主リブ間隔640mm／主リブ高さ170mm、副リブ間隔218.2mm／副リブ高さ110mm、デッキプレートと副リブ付け根の曲率半径Rを9mm、デッキプレートと主リブの付け根と主リブと副リブ交差部の曲率半径Rは製作上の最小値とするが最適形状であることが分かった。
- ・リブ先端のコーナーに曲率半径3mm程度を付けても応力的には満足することが分かった
このリブ先端のコーナーRの成形は、鋳鉄床版では製造時に特段の手間を掛けずに成形することができ、検証は行っていないが、Rが付いた滑らかな形状とすることで塗装付着不足を解消し、塗膜が薄くなることでの早期発錆防止効果が期待できる。
- ・接触面にグリッドブラスト処理および無機ジंकリッチ処理を行うことにより、道路橋示方書に準拠した高力ボルト摩擦接合が可能となることが分かった。

<製造／材料>

- ・市販の鋳造シミュレーションソフト（MAGMA SOFT／MAGMA社）を用いて部位毎の冷却速度を予測し、Cu量、パーライト面積率、引張強さとの相互関係からCu量を決定することにより、材質的に安定した最大1200mm×2500mmサイズの球状黒鉛鋳鉄（FCD）の床版製造が可能であることが分かった。
- ・鋳物が持つ特長的な表面状態である鋳肌の3点曲げ片振幅の疲労強度は、機械加工肌と比べ2～3割程度低下するものの、FCD550材相当で330N/mm²前後を有することを確認した。

<力学性能>

- ・鋳鉄床版単体での静的荷重試験（中央荷重、荷重面積200mm×500mm）において、287kNを荷重したところから塑性域に入り、たわみおよびひずみは増加しながらもT荷重の9倍以上の941kNまで耐荷性能を保持し、リブのき裂、破断などは見られず、十分な塑性変形性能を有することを確認した。
- ・鋳鉄床版単体での定点繰返し荷重試験（中央荷重、荷重面積200mm×500mm）において、①0回～200万回：14.5kN～159kN、②200万回～400万回：15.7kN～173kN、③400万回～1000万回：17.3kN～173kN（応力比0.1）と試験荷重の調整を取りながら累計1000万回の疲労試験を行い、試験中の発生応力、変位は安定し、リブのき裂、破断などは見られず、十分な疲労性能を有することを確認した。
- ・集中荷重による落錘衝撃試験を行い、鋳鉄床版の破壊モードは、衝撃エネルギーが入力された部分から一気にき裂が進展し破断に至るものではなく、限定された範囲内でのき裂発生と破壊に留まることを確認した。

⑧研究成果（つづき）

- ・複数枚を高力ボルトで摩擦接合し連続体とした鑄鉄床版での輪荷重走行試験（主桁間隔3000mm，走行ストローク4600mm，鉄輪載荷157kN）において，200万回（100万往復）の疲労試験を行い，発生最大応力は140N/mm²前後で材料許容応力以下，主桁間中央部のたわみは3mm前後で主桁間隔3000mmに対し1/1000程度，接合部の離間の変動幅は橋軸方向，橋軸直角方向とも0.01mm以下，リブのき裂，破断などは見られず，十分な疲労性能を有することを確認した。

<適用性>

実橋適用に向け，RC床版からの更新を想定した適用範囲と設計例の検討を行い，以下のことが分かった。

- ・RC床版と比較し，重量が2.45kN/m²と軽い鑄鉄床版の特徴から，死荷重を軽減することができ，既設橋の主桁への追加補強を行うことなく取替工事が可能。
- ・RC床版では，床版厚が厚くなることから，路面高の変化への対応が必要であるが，鑄鉄床版は既設橋の路面高での取替工事が可能。
- ・RC床版に比べ，死荷重反力は65～73%，既設橋の80%と低減することから，下部構造の耐震性が向上。
- ・死荷重合計反力は，鑄鉄床版では既設橋と同等であるが，RC床版では24～32%増加し，下部構造の照査が必要。
- ・高力ボルトを使った摩擦接合構造で急速施工が可能であり，全体工期および規制期間が短く，例えば，工事期間中にう回路となる周辺道路の交通量増による渋滞，周辺住民への負担，有料道路では通行料減収などの軽減といった大きなメリット創出が期待可能。
- ・損傷などにより床版取替えを行う場合，必要最小限の該当する部分のみの鑄鉄床版を取り替える部分取替えが容易。
- ・鑄鉄床版の施工面，維持管理面において，道路橋示方書の施工の章を参考に，鑄鉄床版特有となる実施内容を示し，他の床版との相違点を整理した。

⑨研究成果の発表状況

(本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限ります。)

- 1) 山口栄輝, 飛永浩伸, 梅谷拓郎, 村山稔: 鑄鉄床版の開発, 橋梁と基礎, Vol. 51, No. 8, pp. 38-41, 2017. 8
- 2) 飛永浩伸, 村山稔, 佐伯英一郎, 玉越隆史, 山口栄輝, 三木千壽: 球状黒鉛鑄鉄の道路橋床版への適用に関する基礎的研究, 鋼構造論文集, VOL. 24, NO. 95, pp. 13-24, 2017. 9
- 3) 飛永浩伸, 山口栄輝, 村山稔: 球状黒鉛鑄鉄を用いた道路橋床版の塑性変形性能に関する考察, 構造工学論文集, Vol. 64A, pp. 109-119, 2018. 3
- 4) 飛永浩伸, 山口栄輝, 村山稔: 鑄鉄床版の疲労特性に関する検討, 平成 29 年度土木学会西部支部 研究発表会, pp. 59-60, 2018. 3
- 5) E. Yamaguchi, H. Tobinaga, M. Murayama: Development of Durable Bridge Deck for Highway Bridge: Application of Spheroidal Graphite Cast Iron, 2nd International Conference on Engineering Innovation (ICEI 2018), Keynote Lecture, 2018. 7
- 6) 飛永浩伸, 山口栄輝, 村山稔: 球状黒鉛鑄鉄を用いた床版の力学特性, 平成 30 年度土木学会全国大会 第 73 回年次学術講演会, 2018. 8 (掲載予定)
- 7) H. Tobinaga, E. Yamaguchi, M. Murayama: Development of Ductile Cast-Iron Deck for Highway Bridges, 12th Japanese German Bridge Symposium, Keynote Lecture, 2018. 9 (to appear)
- 8) E. Yamaguchi, H. Tobinaga, M. Murayama: Ductile Cast-Iron Deck for Bridge, International Conference on Structural and Civil Engineering Research 2018, Keynote Lecture, 2018. 10 (to appear)
- 9) E. Yamaguchi, H. Tobinaga, M. Murayama: Cast Iron Deck Slab for Highway Bridge, Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS2018), Keynote Lecture, 2018. 12 (to appear)

⑩研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

- 1) 福岡市科学館, 企業ブース, パネル展示 (3年間常設展示), 2017. 10-2019. 9
- 2) メンテナンス・レジリエンスTOKYO 2017, パネル展示, 2017. 7
- 3) メンテナンス・レジリエンスTOKYO 2018, パネル展示, 2018. 7 (予定)
- 4) 建設技術展2018近畿, パネル展示, 2018. 10 (予定)

⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

<課題>

- ・実橋における床版取替え工事および新設橋梁の床版工事への鋳鉄床版の適用
- ・本成果の量産製造技術および品質管理への活用

<展望>

- ・実環境下における疲労耐久性能検証
- ・鋳鉄の持つ優れた疲労特性を活かした他の土木鋼構造物への鋳鉄適用の展開

⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

研究で得られた鋳鉄床版の「疲労に強い」「軽量」「急速施工が可能」「部分取替えが容易」のメリットを活かした、高性能な道路橋床版として現場適用，普及に努めていきたい。

⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今度の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

道路橋床版として求められる性能や老朽化課題に対し、本研究の中で、鋳物の持つ自由形成性と一体成形性、球状黒鉛鋳鉄の材料特性を活かした鋳鉄床版の製造、各種性能検証、適用性検討を通じ、疲労に強く、軽量で、急速施工が可能で、部分取替えが容易といった点を証明したことから、研究目的を達成できたと考える。今後、研究成果である鋳鉄床版の現場適用に向かって更なる活動を継続し、道路インフラの整備に資するよう寄与へ努力していきたい。