

## 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（F S 研究対象）】

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工学研究 院建設社会工学研究系	教授
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	公募 タイプ II : 技術的課題の画期的な 解決を目指す研究
		[副領域]	タイプ
③研究経費（単位：万円） ※受託金額を記入。	平成26年度		
	934		
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	
	恵良秀則	九州工業大学大学院・教授	
	佐伯英一郎	日之出水道機器株式会社・取締役	
	大城桂作	九州大学名誉教授 日之出水道機器株式会社・取締役	
	三木千壽	東京都市大学・学長	
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。）			
<p>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、老朽化が著しく更新の必要性が指摘されているが、古い橋梁の橋脚及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いる。これらの問題を解決するためには、軽量でかつ疲労耐久性の高い床版の開発が必要となる。ここに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」は複雑な形状を自由に整形できるという特徴を有し、溶接が不要となる。加えて、応力集中部の増厚、コーナー R 化等により応力集中を緩和できるため、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て①100年以上の耐用年数で、かつ経済的な鋼製（鋳鉄）床版の実現、②既存の RC 床版の鋳鉄床版への取替え（軽量化）による橋脚・基礎の耐震性向上、③既存橋脚、基礎、主桁をそのまま生かした道路幅員拡大、④施工性の良い施工ディテールの開発による床版取替え時の道路閉鎖車線の縮減と閉鎖期間の短縮、を実現することを目指す。</p>			

的とする。

## ⑥ F S 研究の結果

### 1. F S 採択の条件と H 2 6 年度の研究開発内容

F S 採択時の評価と本格採択に向けた条件を以下に示す。

【評価】：球状黒鉛鋳鉄で鋼床版を製作する試みは、チャレンジングであり新規性が高く、実用化すればコスト面等社会的な効果も高いと想定される。ただし、鋳鉄の鋼床版は前例が無く、製造技術や品質確保等の面で、実橋に適用する際、問題点が無いことを確認する必要がある。

【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

上記条件を満足するために H 2 6 年度は以下の研究開発を実施した。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

### 2. 試設計と経済性の評価

#### 2-1. 設計基準強度と荷重及び設計クライテリア

試設計には以下の設計基準強度と荷重及び設計クライテリアを使用した。

設計基準強度 耐力値：350MPa、許容応力値：205MPa（道路橋示方書に従い「耐力値/1.7」）

荷重 活荷重：T 荷重100kN、衝撃係数：0.4、載荷位置：図3に示す

設計クライテリア 発生応力：許容応力205MP以下、たわみ量：「支間距離L/500」以下、デッキプレート曲率半径：20m以上

#### 2-2. 床版の形状と接合部

鋳鉄床版の形状の特徴として、①走行方向直角方向に主リブを、走行方向に副リブを格子状に配置する、②主リブは発生応力に応じてデプス、厚さ等を変化させる、③局所的な応力集中をなくすためにリブとリブ、デッキプレートとリブの交差部及びリブの先端には適度なR形状を設ける、等の特徴を有する。接合部のイメージを図1、2に示す。鋳物の形状自由度を活用したボルト穴とボス部を有し、主桁とは貫通ボルトで接合する。桁フランジ上面や添接板の凹凸によるレベル差、RC床版とのレベル差や道路勾配等の調整については大型傾斜付き特殊座金を使用して行う。

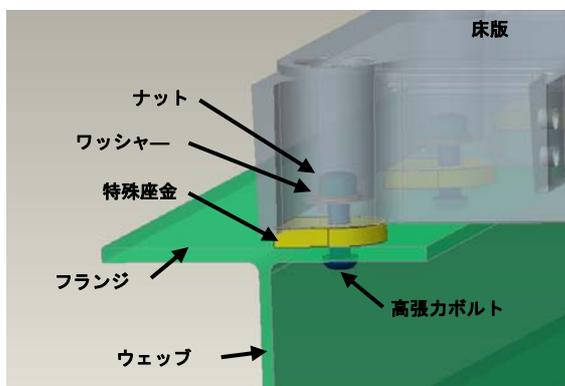


図1 床版—桁接合部イメージ

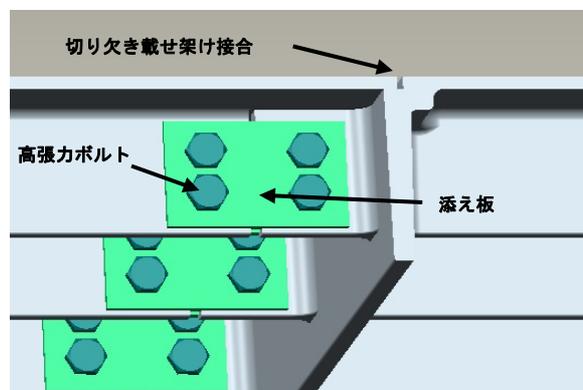


図2 床版—床版接合部イメージ

### 2-3. FEMによる解析と設計

解析は、床版を3枚連結した状態で以下の材料常数、荷重及び拘束条件にて4種類の解析を行った。

- ・ヤング率：170GPa、　・ポアソン比：0.28、　・比重：7.2g/cm<sup>3</sup>
- ・荷重条件：図3に示す位置に200mm×500mmの荷重面積に140kNを等分布荷重で載荷
- ・拘束条件：図4に示す。△はZ変位のみ固定、その他は水平移動を固定

試設計の一例として長辺（スパン）2.5m×短辺1.25mの床版のFEM解析結果を図5に示す。メッシュ分割は応力集中を十分な精度で評価できるよう配慮して、細密に分割している。応力照査はミーゼス応力と引張り主応力を対象とし、その結果を表1に示す。応力、変位ともに基準値内に収まっており、大きな局部的応力集中も発生していない。

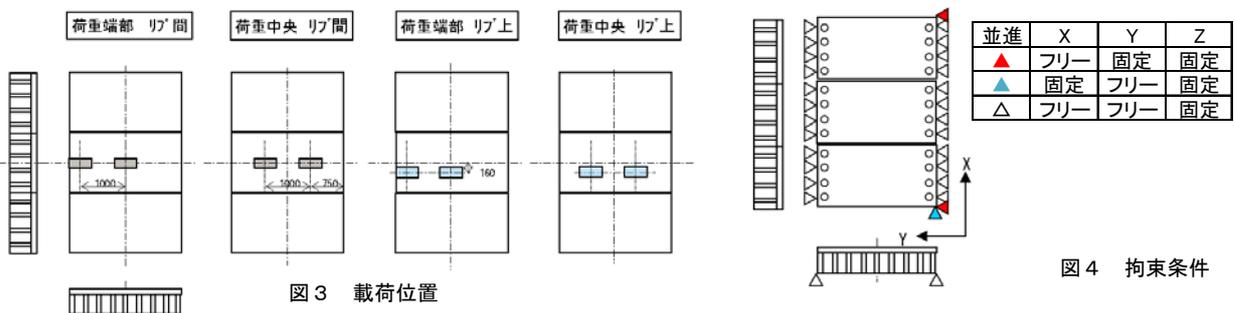


図3 荷重位置

図4 拘束条件

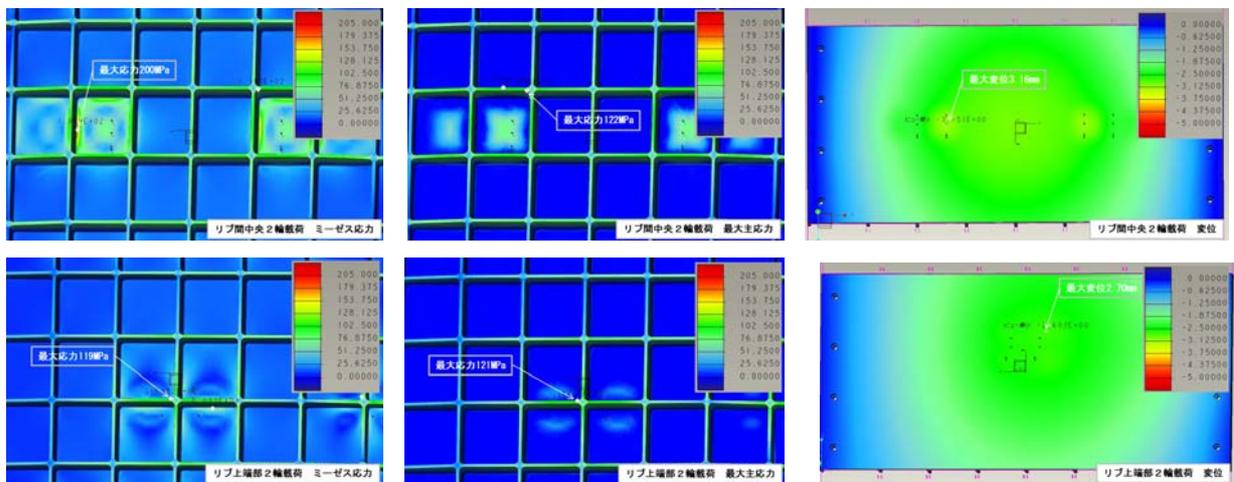


図5 FEM解析結果コンター代表図（左：ミーゼス 中：最大主応力 右：変位）

表1 FEM解析結果サマリー

		中央		端部		基準値
		リブ間	リブ上	リブ間	リブ上	
変位		3.16	3.08	2.97	2.7	<5.0mm
ミーゼス	リブ上	120	116	122	119	<205MPa
	平板リブ交差	200		204		
最大主	リブ上	122	117	124	121	<205MPa
	平板リブ交差					
曲率半径		23.4	104	24.7	94.6	<20m

### 2-4. 経済性の評価

試設計の結果、スパン2.5m～4mの範囲で床版の重量は200～270kg/m<sup>2</sup>であり従来の鋼床版と

同等であった。従来の鋼床版の工場製作単価（積算価格）が40万円/t程度であるのに対して、鋳造品は20万円～30万円/tで製造可能であり、十分な経済性を有することが判明した。施工性についても、①貫通ボルト接合は床版上面から容易に施工が可能であること、②床版はねじれ剛性が小さくボルトの締め付けのみで既存の桁フランジと「なじむ」（隙間を生じない）こと、③フランジの厚さ変化や接合部のレベル変化及びフランジの傾き等にも大型傾斜付き特殊座金（ブッシュ）により容易にレベル調整が出来ること、が確認できた。これらにより既存の方法を用いて経済的に施工できる見通しが得られた。

### 3. 実大鋳鉄床版の製造法の確立と試作

#### 3-1. 目的

図5の鋳鉄床版は薄肉リブ形状を有する大型鋳物であり、要求される材質・寸法精度および外観品質・内部健全性を確保するには、適切な合金設計と湯流れや凝固冷却過程を最適化する鋳造方案（方法の設計）の策定が必須である。世界的に広く利用されているMAGMA社の鋳造シミュレーションソフト（MAGMASOFT）を用いて、熱・流体・凝固FEM解析を行い、製品部へ溶湯をスムーズに充填させ、健全鋳物とするための湯口、湯道、堰、押し湯の形状・配置を決定した。同時に、造型法、溶解・鋳造プロセスを検討し、鋳造品の試作・検証を行った。

#### 3-2. 試作品製造検討フロー

要求される鋳物形状及び材料強度特性等を満足するため、図6に示すフローに基づいて検討を進めた。

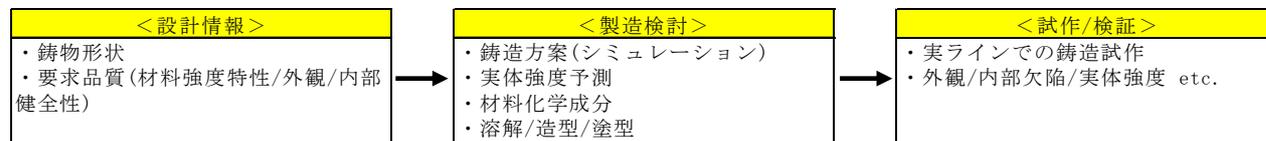


図6 実大モデル鋳鉄床版製造検討フロー

#### 3-3. 試作条件

実大モデル鋳鉄床版の要求性能を満足させるため、実体材質を550MPa級球状黒鉛鋳鉄(FCD550)と定めた。大型鋳物であることや変形の抑制を考慮して、強固なフラン自硬性鋳型を採用した。

#### 3-4. 鋳造品品質評価項目と目標値設定

表2に示す実大モデル鋳鉄床版の製造品質評価項目を満足させるため、鋳造シミュレーションを利用して湯流れの検討及び内部欠陥の抑制を図った。

表2 品質評価項目

項目		評価内容	目標値
実体材質		リブ4箇所より実体切出し、材質強度を評価	550MPa
寸法		鋳物寸法公差_CT11を基本とした図面寸法	図面寸法公差内
鋳造欠陥	異物噛み	応力集中が想定されるリブ先端及びリブ周辺の有無	リブ先端に無きこと
	内部欠陥	リブ交差部およびリブ内部への有無（超音波探傷検査）	有害な欠陥無きこと
	湯境	全面において有無	無きこと
	張り気（肉厚）	平板部肉厚が図面寸法公差内であること	-0mm/+3mm
外観	外ヒ	全面において有無	無きこと
	リブ先端形状	塗型溜り等による形状不十分の有無	形状不十分無きこと

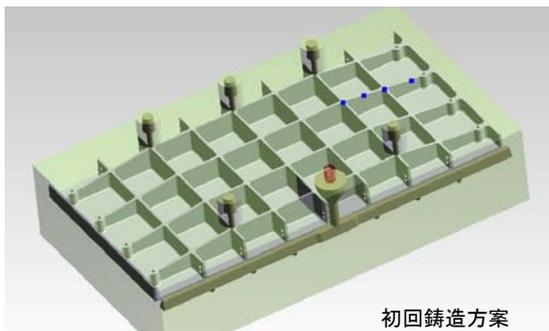
### 3-5. 品質改善のステップと試作結果

初回試作ではリブが上型となる姿勢とし、合金溶湯を製品中腹部より流入させる铸造方案にて実施したが、ノロ/垢や塗型材の「飛ばされ」による異物噛みが多発し、リブ先端部の湯境等の铸造欠陥も散在し、所定の強度は得られなかった。そこで、表3に示す通り溶湯成分値の調整、铸造姿勢の上下逆転(図7)、堰(製品への溶湯流入口)の位置と断面積の調整(図7)、塗型剤/手法の変更(図8、9)等を繰り返し、铸造シミュレーションの解析条件(铸物-砂間の熱伝達係数、铸型の熱伝導率等)の調整を行うことにより铸造解析精度を向上(詳細は後述)させ、目標品質を満足する実大モデル铸铁床版の製造技術を確立した(図9)。

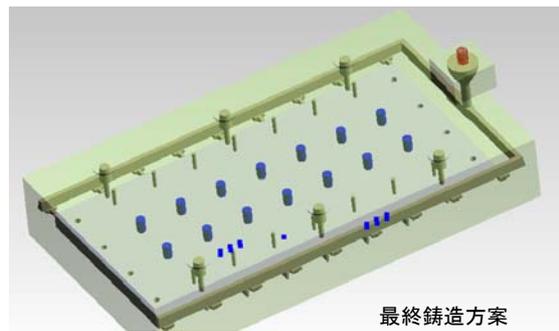
なお、铸造した床版は所定の寸法精度と外観品質を有していたが、格子状リブ交差部の下方芯部は凝固が遅れるため、超音波探傷検査の結果、リブ先端から76mm以上の範囲において小さな収縮巣が存在することが確認された。

表3 実大モデル製造上の問題点と対策内容

発生	対策内容
実体引張強度不足	→ 部位別の実体強度の傾向から元湯成分を調整 → 接種タイミングを球状化処理時から注湯直前へ調整
リブ表面及び周辺部の異物噛み	→ 铸造姿勢を上下反転 → 堰位置を製品側面部へ変更 → 塗型剤を水からアルコールへ変更
湯境	→ 湯道/堰断面積の調整 → 傾斜注湯
内部欠陥	→ 押し湯と冷やし金を配置し熱バランスを調整



初回铸造方案



最終铸造方案

図7 改善前後の铸造方案



図8 塗型作業状況



図9 製品外観 (1250×2500mm)

この収縮巣については製造技術的に抑制することは可能であるが、経済性を考慮して、強度的に問題のないサイズ・位置に制御することにした。

### 3-6. 铸造シミュレーションの予測精度向上

球状黒鉛铸铁の強度特性は基地部の組織(フェライト・パーライトの割合)に依存するため、铸物の各部位の強度を予測するには、溶湯铸込み後の冷却過程における铸铁の変態に大きな影響を及ぼす温度変化を把握する必要がある。

MAGMASOFTで標準的に設定されている铸型物性値等を用いて、図10に示す位置の铸込み後の温度

変化を求めるとともに、鋳造前に鋳型内の製品キャビティ部に熱電対を挿入し、解析と同じ箇所の温度変化を測定した。図 1 1 に示すように、解析と実験結果には鋳物の強度を左右する共析変態温度域でかなり大きな差異があった。これは鋳型条件(鋳型砂の粒度や充填密度等)が異なることより、鋳鉄溶湯と鋳型間の熱伝達係数や鋳型内部の熱伝導率に相違があるためである。これらの物性値を適正に修正することにより、鋳造品内部の温度変化を精度良く予測出来るようになった。

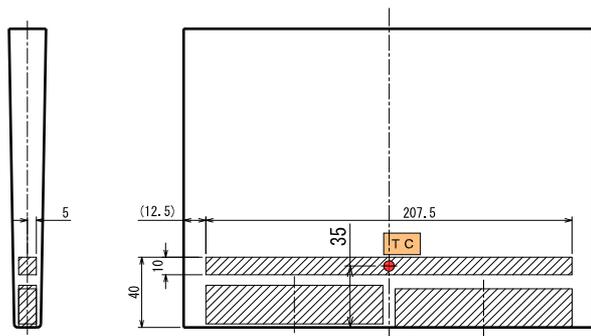


図 1 0 鋳鉄床版リブ部の温度測定位置

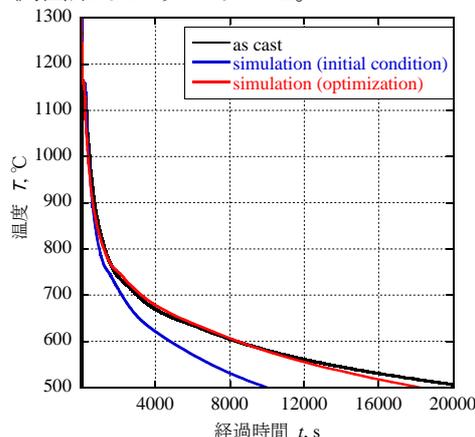


図 1 1 実測及び解析による冷却曲線

### 3-7. 鋳鉄床版実体の組織制御技術の確立

床版鋳物を強度面で保証するため、鋳物の各部位ごとの強度特性を予測する技術を開発した。球状黒鉛鋳鉄の強度は、化学成分や冷却速度等の影響を受ける。そこでまず、鋳鉄床版実体から試験片を採取し、DTA 装置を使用してオーステナイト域に再加熱後、種々の速度で冷却した時の共析変態過程を測定し、図 1 2 に示す CCT 曲線(連続冷却変態曲線)を得た。冷却パラメータとして 900°C から 700°C までの平均冷却速度  $CR_{9/7}$  を求め、パーライト率との関係で整理した結果、図 1 3 に示すように  $\log CR_{9/7}$  とパーライト率はよい直線関係にあり、 $CR_{9/7}$  が增大するほどパーライト率が増加する。図 1 3 中に MAGMASOFT で計算した床版鋳物と同じ冷却過程で熱処理した試験材のパーライト率を◆、鋳物の組織の実測値を■で示した。as cast の方がやや高いパーライト率になっているのは凝固偏析等によるもので、この差異は補正できる。したがって、鋳物の各部位の  $CR_{9/7}$  の計算値から固相変態過程とパーライト率が求められ、図 14 のパーライト率と引張強さの関係から強度特性の予測が可能である。即ち、床版鋳物に所定の強度特性を付与するにはパーライト率の制御が必須であり、鋳鉄の化学成分の中で共析変態特性(CCT 図)に及ぼす影響が大きい Cu 量の調整により実現できる。

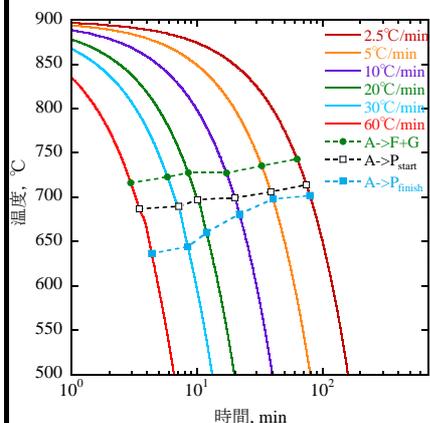


図 1 2 鋳鉄床版実体の CCT 曲線

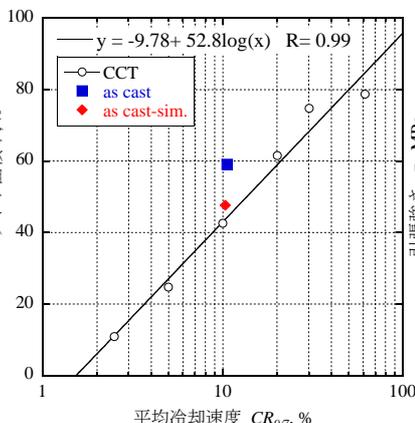


図 1 3 平均冷却速度とパーライト面積率の関係

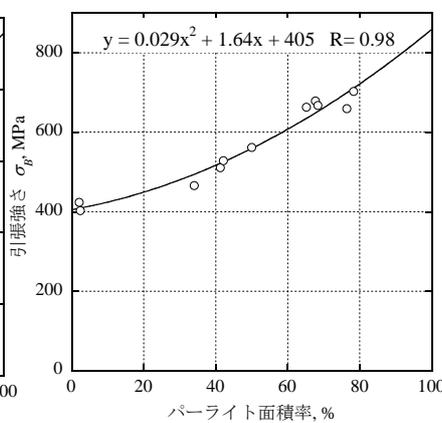


図 1 4 パーライト面積率と引張強さの関係

#### 4. 試作品の機械的特性（引張り試験）

新たに確立された製造法により試作された床版のリブ部より試験片を採取し、引張試験、硬さ試験、組織観察を実施した。

床版実体からの試験片の採取位置を図15、16に、試験片の形状を図17に示す。試験片はJIS14A号を使用し、試験条件はJISZ2241に準拠した。引張速度は0.5mm/minとした。

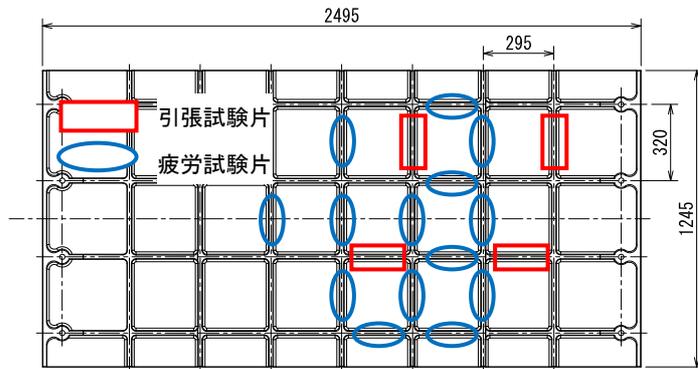


図15 床版実体からの試験片採取位置

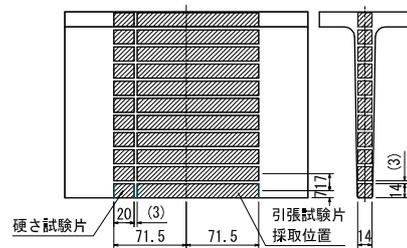


図16 実体切出し品からの引張試験片採取位置

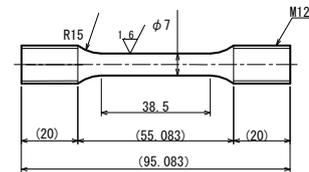


図17

引張試験片 寸法

採取場所ごとの引張試験結果を図18に示す。強度、耐力、伸びとも所定の性能を確保しており、铸铁床版として十分な性能が確保できることが確認できた。図19に示すよう硬さ及び組織についても所定の条件を満足している。

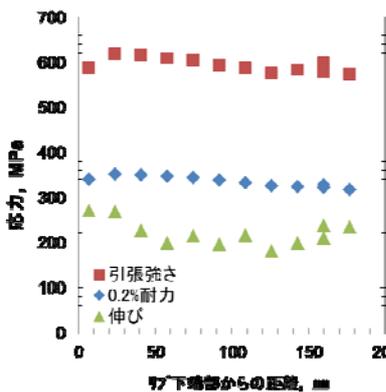


図18 採取場所ごとの引張試験結果

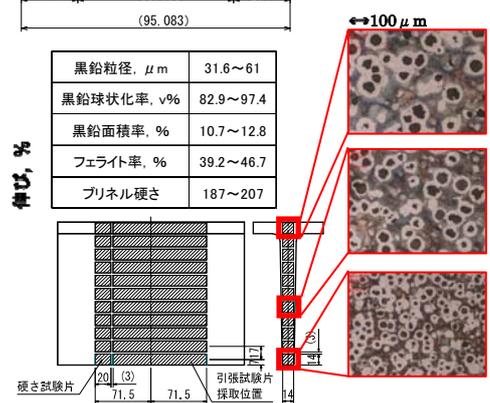


図19 採取場所ごとの組織と硬さ

#### 5. 試作品から採取した鑄肌付き試験片の疲労特性

前節と同じ製造法で製造した床版のリブ部より鑄肌付きの試験片を採取し、3点曲げ疲労試験を実施した。

図15に疲労試験用リブの採取位置を示す。図20に示すように、リブ先端より鑄肌付きの試験片を2本採取し、一体は鑄肌のままで、一体は機械加工をして疲労試験を実施した。試験体の形状を図21に示す。

試験条件は、応力比：0.1、周波数：25Hz、試験温度：24度、試験機は電気油圧サーボ式試験機（図22）を使用した。

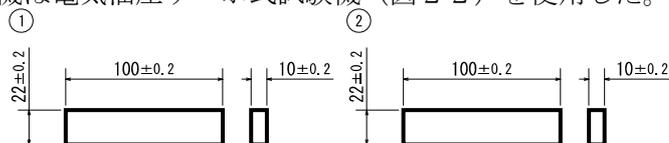


図21 試験片形状（左：鑄肌付き、右：加工肌）

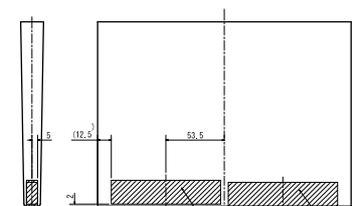


図20 3点曲げ疲労試験片採取位置



図22 3点曲げ疲労試験機

試験結果を図 2 3 に示す。実大床版から採取した鋳肌付き試験片のS-N曲線は加工肌試験片のS-N曲線よりも2~3割程度低下し、既往の文献とも合致する。鋼の溶接部と比較してはるかに高い性能を有する。本疲労曲線とFEMで得られた応力と照査することにより床版の疲労耐久性が推定できる。

## 6. 試作品の静的载荷試験

静的载荷試験により発生する歪とFEM解析結果との比較を行うことによりFEM解析の有用性の検討を行う。併せて、疲労試験の荷重設定を静的試験の歪より逆算する。

### 6-1. 供試体と試験条件

床版主要部の設計寸法と供試体の寸法測定結果を表 4 に示す。「型調整」をしていないために試作品はやや「厚め」である。

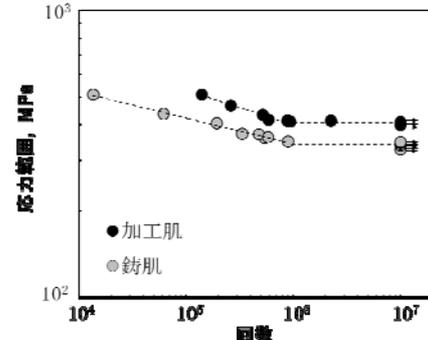


図 2 3 鋳肌付き試験片 S-N 曲線

表 4 設計寸法及び供試体寸法測定結果

			単位: mm (重量: kg)								
			橋軸方向長さ	橋軸直角方向長さ	総高さ	平板厚	主リブ厚	主リブ高さ	副リブ厚	端部リブ高さ	重量
供試体No	製造日	図面寸法	1245.0	2495.0	185.0	13.0	15.0	172.0	15.0	113.0	710.0
供試体①	6月5日	実寸	1244.0	2493.5	187.5	15.7	16.5	172.5	17.0	115.5	764.0
供試体②	6月20日	実寸	1245.0	2492.0	187.0	15.9	17.0	172.0	17.0	115.5	768.0
平均			1244.5	2492.8	187.3	15.8	16.8	172.3	17.0	115.5	766.0
モデル寸法			1245	2495	187.3	15.8	16.8	172.3	17	115.5	

図 2 4 に試験状況の写真を示す。供試体は架台を介してサーボパーサー（最大荷重300kN）にセットした。载荷は床版中央部においた200mm×500mmの载荷板（ゴム板10mm）を介して载荷した。



図 2 4 静荷重試験状況

荷重は疲労試験の载荷荷重を超えない範囲で100kNまで载荷した。図 2 5 に歪みゲージ貼り付け箇所及び変位測定位置を示す。

### 6-2. 測定結果及び評価

表 5 に主要部位の応力測定結果と実寸法モデルで解析したFEM解析の結果を示す。発生応力値が高い部位は、载荷位置直下の主リブ先端である。実験とFEM解析結果を比較すると誤差は±10%程度である。本実験は床版のボス穴にボルトを挿入し、架台のH形鋼のフランジに接合している（図 1）。したがって床版端部はある程度拘束されており境界条件が明確でない。

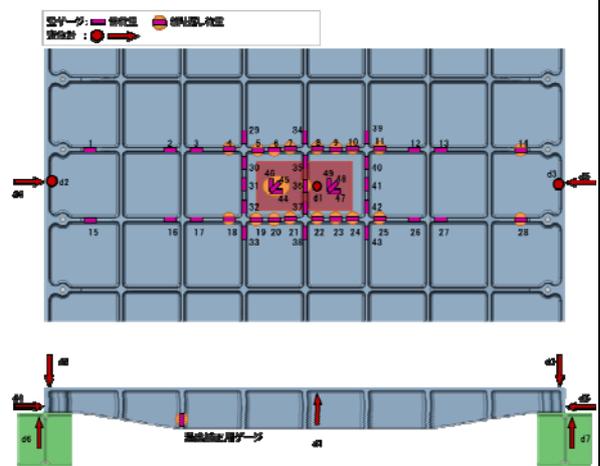


図 2 5 歪みゲージ貼り付け位置

これらを考慮するとFEMは床版の発生応力を推定する有力な手法であることが確認できた。

## 7. 試作品の疲労試験

### 7-1. 供試体と試験機

供試体及び試験機は静荷重載荷試験に使用したのと同じものを使用した。

### 7-2. 試験条件

今回の載荷条件におけるFEM解析の最大応力発生位置は図26に示すように中央の副リブと主リブの交点に近い主リブ端部（Rの始点）に発生しており、最大応力は118.1MPaである。表6は図26に示すNo6、20の位置のFEM応力と上記最大応力を比較したもので、その比率は140%である。したがって疲労試験で発生するNo6、20の発生応力が許容応力（205MPa）の1/1.4となるような最大荷重を設定することにした。応力比は約0.1とした。

最初の200万回は静的載荷試験の荷重一発生応力を参考に荷重振幅を設定した。その結果、動的発生応力は所定の値よりも約5%小さい結果となった。200万回～400万回は疲労試験で発生する歪を参考に振幅荷重を16kN～170kNと設定した。周波数は4Hz、応力等の計測タイミングは①初期状態、②1万回、③以降5万回毎、とした。サンプリングタイムと周波数は各々2s、100Hzである。

### 7-3. 試験結果

図27に測定点の発生応力の一例として、200万回～400万回の測定結果を示す。測定点の最大発生応力は約150MPaであり、供試体の最大発生応力値は210MPa程度と推測出来る。たわみは3.3mmで推移しており、架台との接合部の水平・鉛直変位もほとんど変化は見られなかった。

### 7-4. 試験後評価

図28に目視及び磁粉探傷による疲労き裂チェック箇所（全10か所）を、図29に表面性状及び磁粉探傷状況写真の一例を示す。最大応力の発生している中央の主リブと副リブの交差部（6か所）及び主リブのデプスの変化点（4か所）について磁粉探傷を行った。その結果疲労き裂は発生していないことを確認した。鋳鉄床版は十分な疲労耐久性を有することが確認できた。

表5 主要部位の応力測定結果 単位：MPa

測定ポイントNo	100kN		
	実験	FEM	実験/FEM
6	84.2	84.1	100.0%
7	77.0	82.2	93.7%
8	78.4	82.2	95.3%
9	83.6	84.1	99.4%
20	89.9	84.1	107.0%
21	80.1	82.7	96.8%
22	79.7	82.7	96.4%
23	81.4	84.1	96.9%

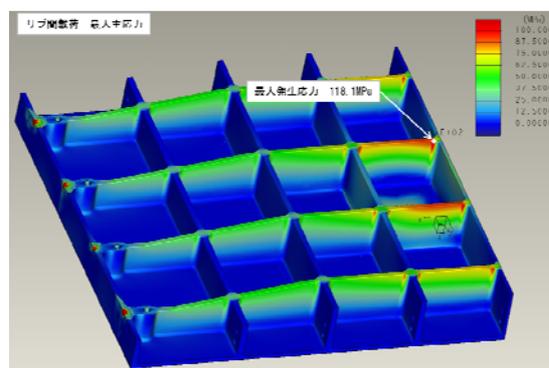


図26 実寸法モデルでのFEM解析結果カウンター図

表6 歪ゲージ貼り付け箇所と最大発生応力の関係

No. 6, 20 (A)	最大発生応力 (B)	比率 (B/A)
84.1MPa	118.1MPa	140%

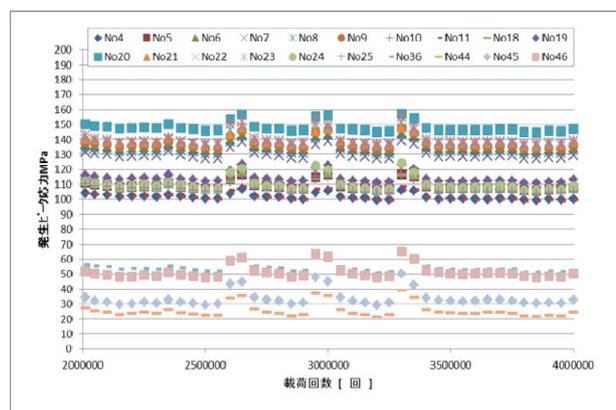


図27 200～400万回試験結果

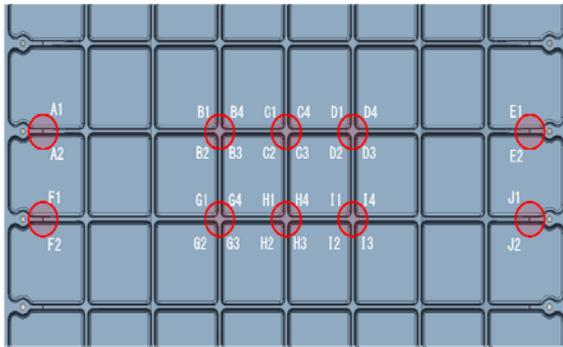


図 2 8 疲労き裂チェック箇所

○のリップ及びリップ交差部を確認。記号の方向からリップ、リップ交差部の評価を行った。

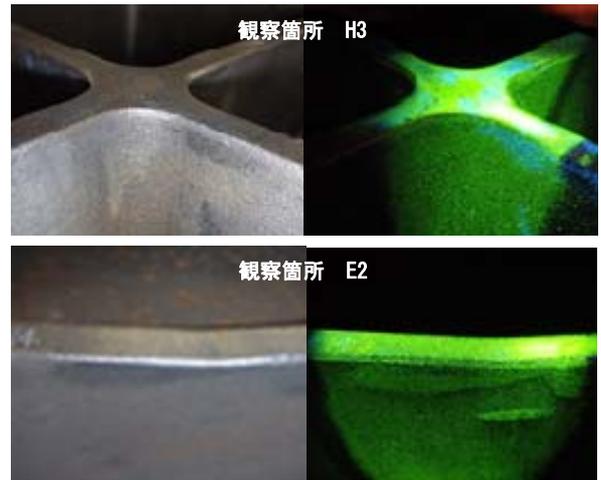


図 2 9 代表的な磁粉探傷観察箇所（左：目視、右：磁粉探傷）

### ⑦本格研究の見通し

H 2 6 年度は F S 採択の条件を満足するために、前章⑥2. ～7. に示す研究開発を実施した。

その結果として、①実大鋳鉄床版の製造は可能であること、②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していること、③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ており、溶接部と比較して極めて優れた疲労性能を有すること、④静荷重試験結果は F E M 解析と一致し変形や応力は解析で予測できること、⑤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、4 0 0 万回後にも全く疲労亀裂が発生しないこと、⑥試設計および施工検討により従来の鋼床版と比較して同等以上の経済性を有する見通しが得られたこと、が明らかになった。以上の成果により、**疲労特性に優れかつ経済性を有する鋳鉄床版の実現性は高いと判断できる。**

「F S 採択の条件」以外にも、①試設計 F E M の応力分布の照査により、コーナー R 形状は応力集中が少なくリップの交差部の応力も小さいこと（図 3 0）、②副リップを設けることにより輪荷重位置による局部応力の変動が少ないこと、③実験架台との接合により、貫通ボルトで容易に施工できること（図 3 1）、等が明らかになった。

以上本 F S 研究により提案時に掲げた研究の目的・目標は十分に達成できる見込みである。

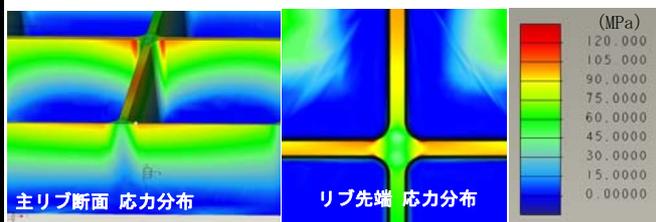


図 3 0 応力集中部の照査



図 3 1 実験架台への取り付け

### ⑧特記事項

特になし