

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
	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 (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) ※H26は精算金額、H27は 受託金額、H28は計画額 を記入。端数切り捨て。	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	総合計
	433万円	2,782万円	3,500万円	1,000万円	7,715万円
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			
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					
<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。</p>					

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、100年以上の耐用年数を持ち、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

1. FS 採択の条件と H26 年度の研究成果および H27 年度研究計画

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・品質などに問題ないことを示すこと」を満足するために、H26年度は(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、を実施し、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した。またH27年度は以下の項目を計画した。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荷重試験の実施
 - ・ 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

2. H27年度研究成果

2-1. 鋳鉄床版の最適形状の開発

床版の必要性能を満足し最も経済的な形状を把握するため三次元有限要素法（FEM解析）を用いて分析した。

2-1-1. 設計基準強度と荷重、設計クイテリヤ

使用した設計基準強度と荷重および設計クイテリヤを以下に示す。

設計基準強度 耐力：350N/mm²、許容応力度：205N/mm²（「耐力/1.7」）

荷重 活荷重：T荷重100kN、衝撃係数：0.4

設計クイテリヤ 発生応力：許容応力値205N/mm²以下、たわみ量：「支間長/500」以下

デッキプレート曲率半径：20m以上

2-1-2. 最適形状の検討項目

最適形状を求めるにあたり、①リブ配置間隔の最適化、②リブ断面の最適化、③コーナーRの最適化、についてFEM解析による比較シミュレーションを行った。

2-1-3. 解析条件、拘束条件、材料常数

図1-1. に示すようデッキプレート上の荷重位置を(a)～(d)と想定した中で最も応力的に厳しくなると考えられる(c)の荷重位置を解析条件とした。なお道路橋示方書には「併走する車両間隔＝荷重位置間隔は1000mm」とあるが本解析(c)ではデッキプレートから荷重面積が

飛び出してしまうことから、より厳しい条件となる「間隔950mm」を载荷位置とした。
材料定数、拘束条件を表1-1、図1-2に示す。

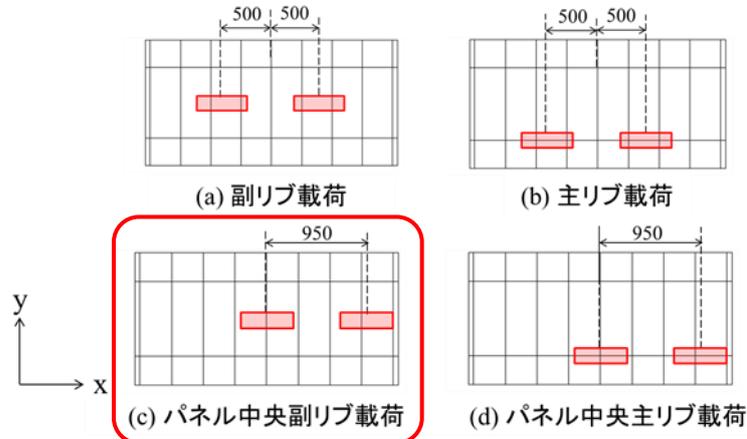


図1-1. 载荷位置

表1-1. 材料定数

ヤング率 E (N/mm^2)	1.7×10^5
ポアソン比 ν	0.28
単位体積重量(kN/m^3)	72

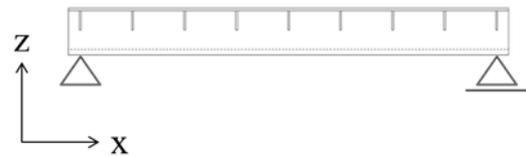


図1-2. 拘束条件

2-1-4. 最適形状設定にあたっての検討パラメータ

最適形状を求めるにあたっての検討パラメータを図1-3に示す。

デッキプレート寸法/厚みは昨年度の評価研究において試作した鋳鉄床版の寸法を適用した。

- X 、 N_X ：副リブ間隔、副リブ本数
- Y 、 N_Y ：主リブ間隔、主リブ本数
- h_X 、 h_Y ：副リブ高さ、主リブ高さ
- t_X 、 t_Y ：副リブ厚み ($h_X/10.5$)
主リブ厚み ($h_Y/10.5$)
- デッキプレート寸法：1245mm x 2495mm
- デッキプレート厚み：13mm

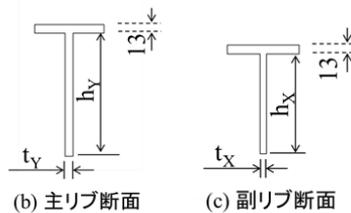


図1-3. 検討パラメータ

2-1-5. リブ配置間隔の最適化

前述の解析条件に基づき表1-2に示す組合せのFEM解析を行うことにより最適な主/副リブ間隔（本数）の分析を行った。まずは鋼床版設計ソフトで最適形状の概略を求めそれを元に主/副リブ高さを+20%～-20%加減させることによりリブ高さの最適化も行った。

表1-2. 主リブ, 副リブ間隔の組合せ

	主リブ							副リブ					
間隔 (mm)	1245	700	640	420	320	260	220	1200	800	600	400	300	200
本数 (本)	1	2	2	3	4	5	6	3	4	5	7	9	13
合計 (パターン)	7							6					

表1-3に主リブ間隔640mm, 副リブ間隔300mmケースの解析事例を示す。表中の数値は鋳鉄床版の単位橋面積当たり重量 (kgf/m²) を表している。この主/副リブ高さの組み合わせでは主リブ高さ180mm, 副リブ高さ130mmが最小重量となることが分かる。

同様な方法でその他のケースの解析を行いその結果を表1-4～表1-6に示す。

表1-3. 主リブ間隔640mm, 副リブ間隔300mm解析事例

		主リブ高さ h_y (mm)						
		200	190	180	170	160	150	140
副リブ高さ h_x (mm)	170	209.3	204.9	200.9	197.0	193.4	×	×
	160	201.4	197.0	193.0	189.0	185.5	×	×
	150	193.5	189.1	185.1	181.2	177.6	×	×
	140	186.5	182.1	178.1	174.2	×	×	×
	130	179.6	175.2	171.3	×	×	×	×
	120	173.6	×	×	×	×	×	×
	110	×	×	×	×	×	×	×
	100	×	×	×	×	×	×	×

表1-4. リブ断面最適化を行った際の鋳鉄床版重量 (kgf/m²)

		主リブ間隔 (mm) 【本数】						
		1245 【1】	700 【2】	640 【2】	420 【3】	320 【4】	260 【5】	220 【6】
副リブ間隔 (mm) 【本数】	1200 【3】						266.1	197.8
	800 【4】					—	217.8	190.5
	600 【5】					—	186.6	180.5
	400 【7】				196.8	175.8	180.4	
	300 【9】	176.0	171.3	171.3	171.9	179.1		
	200 【13】	178.4	181.2	172.7	177.4			

表1-5. リブ断面最適化を行った際の主リブ高さ (mm)

		主リブ間隔 (mm) 【本数】						
		1245 【1】	700 【2】	640 【2】	420 【3】	320 【4】	260 【5】	220 【6】
副リブ間隔 (mm) 【本数】	1200 【3】						210	150
	800 【4】					—	190	140
	600 【5】					—	150	130
	400 【7】				180	150	140	
	300 【9】	220	180	180	160	150		
	200 【13】	210	180	180	160			

表1-6. リブ断面最適化を行った際の副リブ高さ (mm)

		主リブ間隔(mm) 【本数】						
		1245 【1】	700 【2】	640 【2】	420 【3】	320 【4】	260 【5】	220 【6】
副リブ間隔 (mm) 【本数】	1200【3】						180	190
	800【4】					—	150	170
	600【5】					—	150	150
	400【7】				160	130	130	
	300【9】	150	130	130	120	120		
	200【13】	130	120	110	100			

最小重量となるリブ配置間隔とリブ断面の組合せは、主リブ間隔/高さが640-700mm/180mm、副リブ間隔/高さが300mm/130mmの場合で単位当たり重量171.3kgf/m²となった。

本分析結果は①接合を配慮した形状、②接合部の重量、③製造性向上のための形状、を検討対象としていないため、実際の重量より少なめの値となっている。

2-1-6. コーナRの最適化

コーナRは鋳物を製造する際は比較的任意に且つ容易に一体成形することが可能である。

応力集中を緩和させるための曲率半径Rは、小さくすると製造難易度が高く、逆に大きなRは多大な重量増につながり経済性を損なう。

図1-4にR化の対象部位を示す。

本論ではリブ付け根部などのR寸法は10~20mmの範囲でFEM解析による検討を行った。

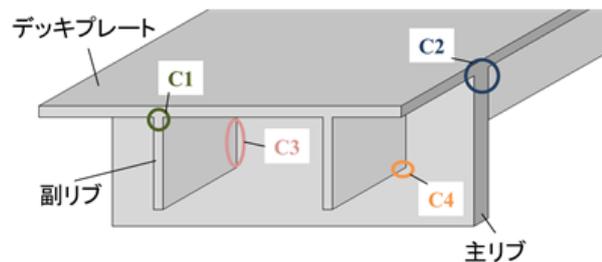


図1-4. R化の対象部位

図1-5にC1部の解析結果を示す。R無しで解析した場合の最大主応力は183.4N/mm²であるが、R=10mmの場合は143.1N/mm²となり、22%低減している。

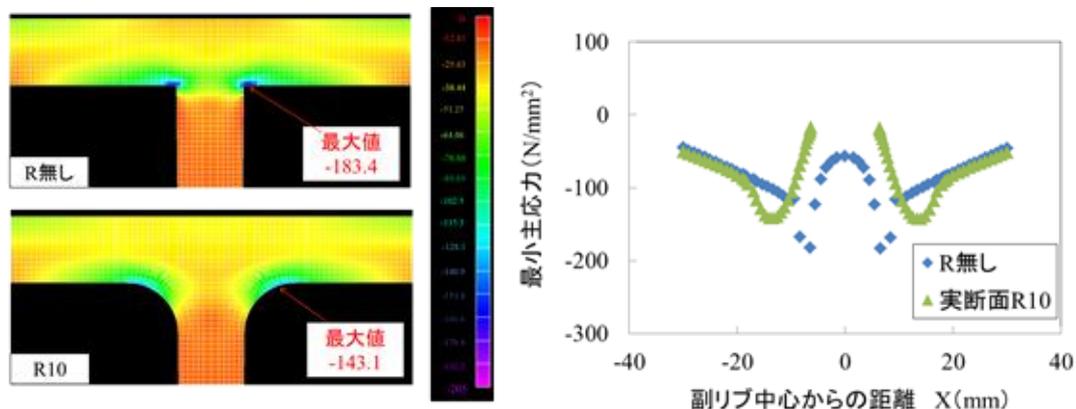


図1-5. C1部解析結果

図1-6、図1-7にC3部、C4部の応力状態を示す。R=10mmとすることで最大応力は22%低減している。

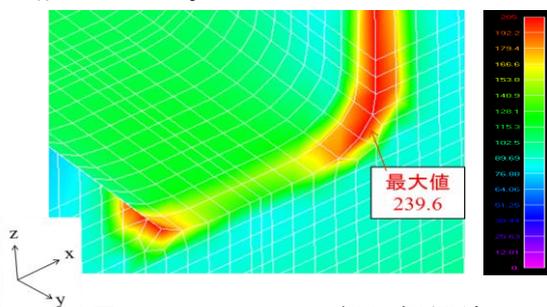


図1-6. C3、C4 R無し解析結果

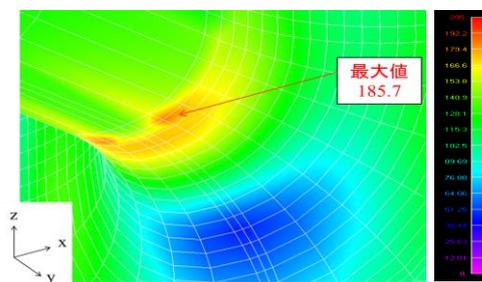


図1-7. C3、C4 R10解析結果

リブ先端にRを3mmを付けた解析結果を図1-8に示す。最大応力はリブ先端部で201.3N/mm²である。リブ先端のコーナーR加工は断面欠損という面もあるが、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。

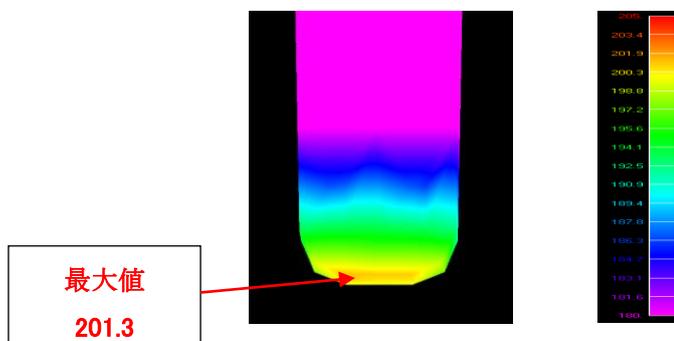


図1-8. リブ先端 R3解析結果

2-2. 力学性能の検証と評価

2-2-1. 変形性能確認実験

H26年度FS研究では弾性範囲内载荷試験を行い、FEM解析と実験の比較を行った。その結果、主要な部位の発生応力は誤差10%以内に収まっておりFEMによる予測が可能であることを報告した。今年度は、実大鋳鉄床版の変形性能を把握することを目的に弾塑性载荷試験を実施し、十分に塑性変形をさせた後に磁粉探傷検査でき裂発生等を確認した。

①供試体と試験機

供試体の概要を図2-1寸法測定結果を表2-1に示す。材料の応力-ひずみ関係を図2-2に示す。試験機は島津製作所製2000kN荷重試験機を使用した。

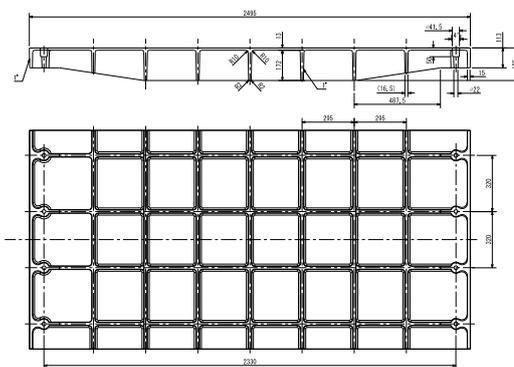


図2-1. 静荷重試験用供試体

	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
図面寸法	1245.0	2495.0	185.0	13.0	15.0	172.0	15.0	113.0
実寸	1244.0	2494.0	187.3	15.3	15.5	172.0	15.5	113.0

表2-1. 寸法測定結果

試験機は島津製作所製2000kN荷重試験機を使用した。

②実験条件

図2-3に示すように試験用治具の上に床版を配置し、床版中央に1点荷重で試験を実施した。荷重部は荷重試験機ハットと床版の間に鋼製荷重板（200mm×500mm×50mm）、ゴム板（200mm×500mm×10mm、繊維補強有）を挿入した。

- ・計測位置：図2-4に示す位置にひずみゲージ39か所、変位計5か所を設置した。
- ・荷重スピードは荷重制御で315kN/minとし、ストローク制御では6mm/minとした。
- ・測定は所定の荷重を荷重し1分間保持した後に行った。測定後、緩やかに除荷し残留ひずみと残留変形を測定した。

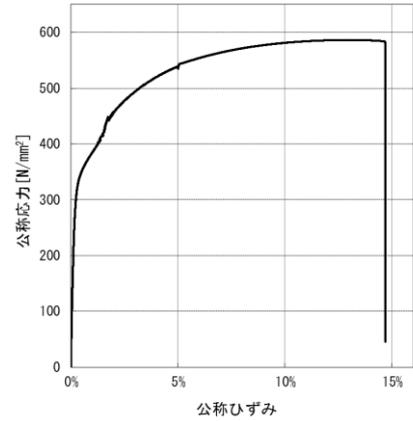


図 2-2. 材料の応力-ひずみ関係

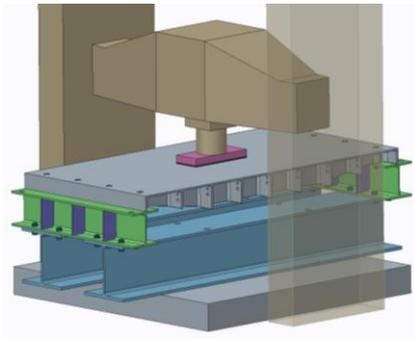


図 2-3. 静荷重試験配置図

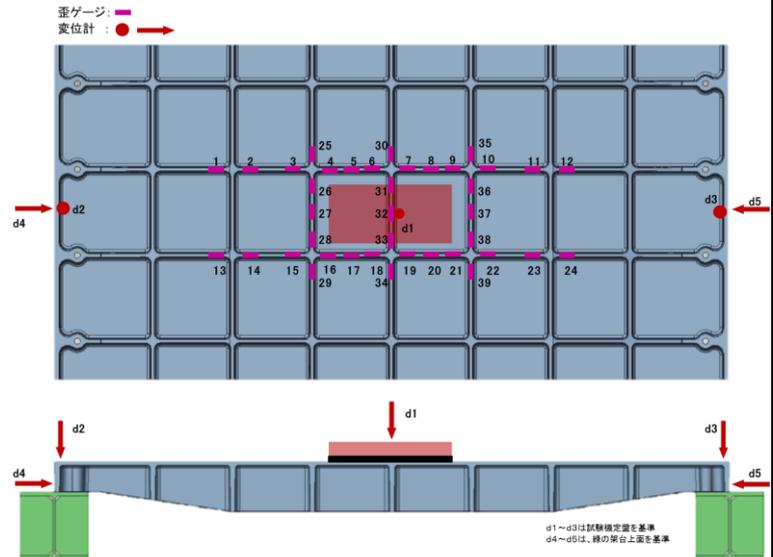


図 2-4. 計測位置（ひずみ、変位）

③実験結果

荷重点の荷重と変位の関係を図2-5に、主要な位置のひずみと荷重の関係およびひずみと変位の関係を図2-6、図2-7に示す。

グラフより、試験荷重300kN程度で塑性域に達することがわかる。また、主リブのみを固定した試験条件から、荷重および変位の増加とともに主リブのひずみが増加していくことが確認できる。

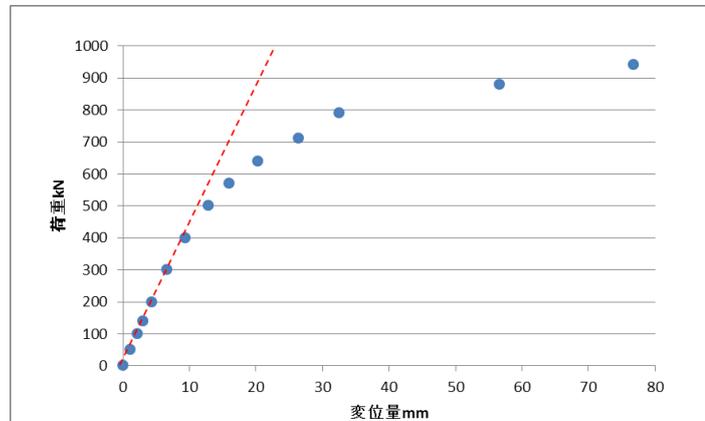


図 2-5. 荷重-変位の関係 (P- δ)

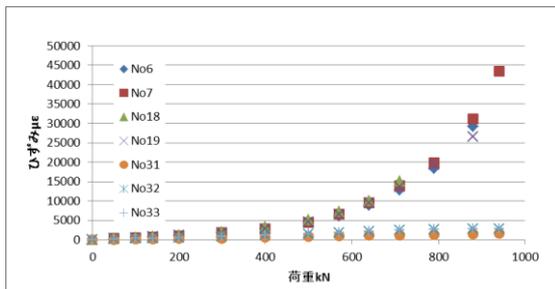


図2-6. ひずみ-荷重の関係

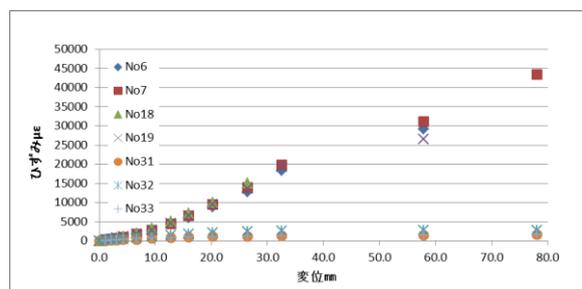


図2-7. ひずみ-変位の関係

最終載荷状態（変位：76.8mm：載荷荷重：941kN）の変形状態および除荷後の残留変形した供試体の写真を図2-8、図2-9に示す。除荷後の残留変形は49.3mmであった。また図2-10に示す実験後に行った磁粉探傷検査で、リブにき裂の発生は見られなかったことから、十分な塑性変形性能があることが確認できた。



図2-8. 941kN載荷時の状態



図2-9. 除荷後の塑性変形状態

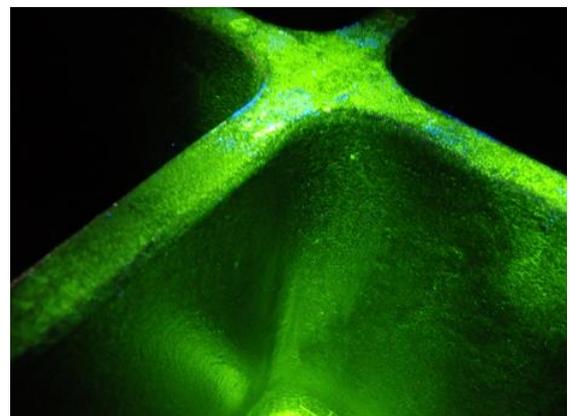
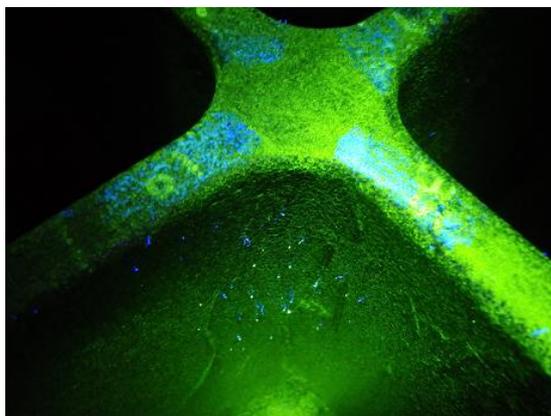


図2-10. 変形性能確認実験後 磁粉探傷検査結果

2-2-2. 床版の疲労性能の確認のための疲労実験

H26年度のFS研究において最大応力が許容応力（0.2%耐力/1.7）の場合の片振幅疲労実験で1000万回経過後も鋳鉄床版には疲労き裂は発生しておらず十分な疲労性能を有することを確認した。今年度はき裂発生を確認できる応力振幅による片振幅疲労実験を行った。

① 供試体と実験条件

試験機の載荷能力内で疲労き裂が発生する応力を発生させるために、図2-12に示すよう1245mm x 2495mmの鋳鉄床版を半分に切断した605mm x 2495mmの供試体を準備した。表2-3に供試体の寸法測定結果、図2-13にひずみゲージ、変位計取付け位置を示す。

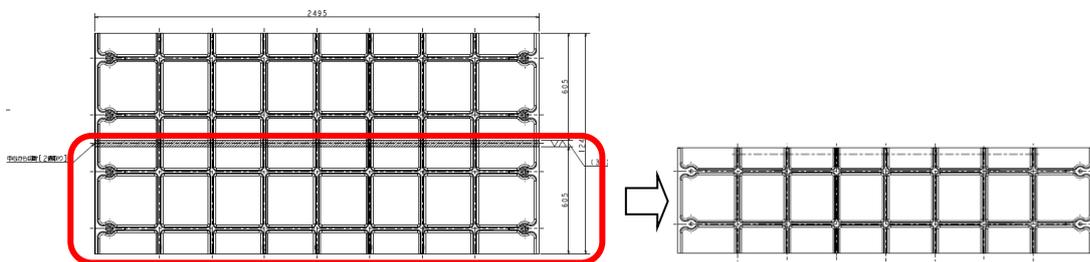


図2-12. 疲労実験用供試体

表2-3. 供試体寸法測定結果

	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
図面寸法	605.0	2495.0	185.0	13.0	15.0	172.0	15.0	113.0
実寸	605.5	2495.0	186.0	15.6	15.5	172.7	15.5	113.0

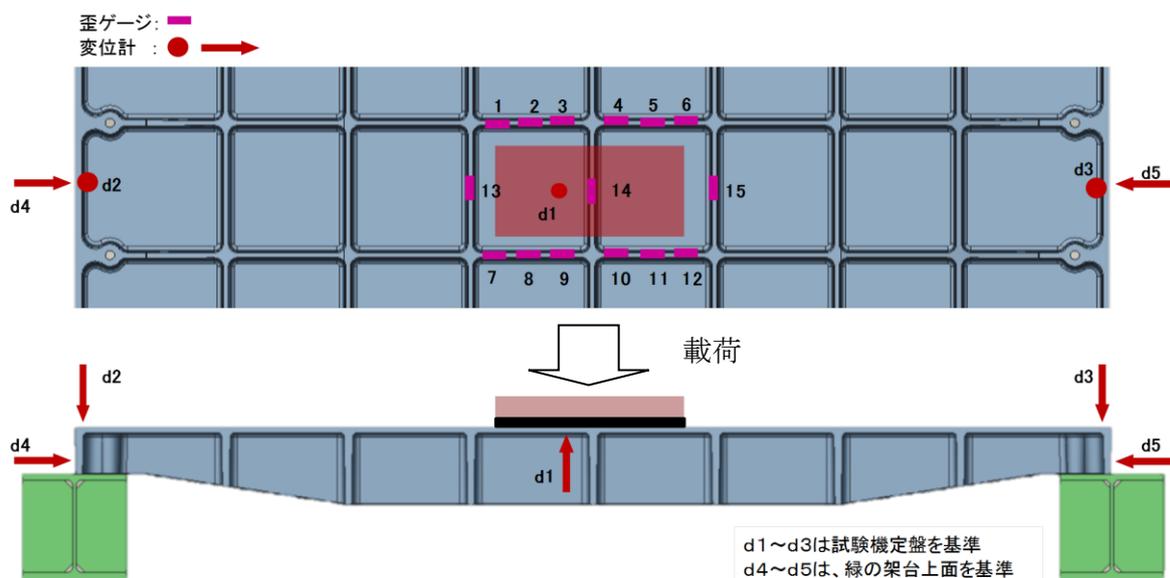


図2-13. ひずみゲージ、変位計取付け位置

図2-14に実験状況図を示す。

供試体は架台を介してサーボハルサー（最大繰返し荷重200kN）にセットし、荷重は床版中央部に200mm x 500mm x 50mmの荷重板（下部にゴム板10mm厚）を介して行った。

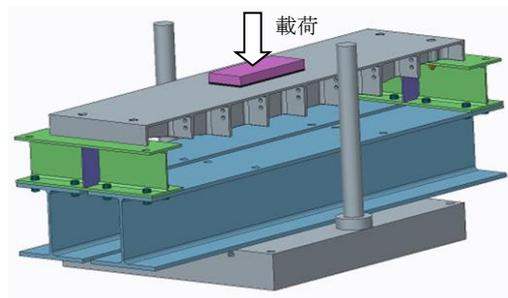


図2-14. 実験状況

②振幅荷重荷重

図2-15に示す鋳鉄床版実体のリブから切出した鋳肌付きテストピースの3点曲げ疲労試験の結果から50万回で疲労き裂が発生する応力範囲は約360N/mm²である。

この試験の応力比0.1を考慮した中での鋳鉄床版供試体における最大発生応力は $360\text{N/mm}^2 \div (1-0.1) = 400\text{N/mm}^2$ となる。

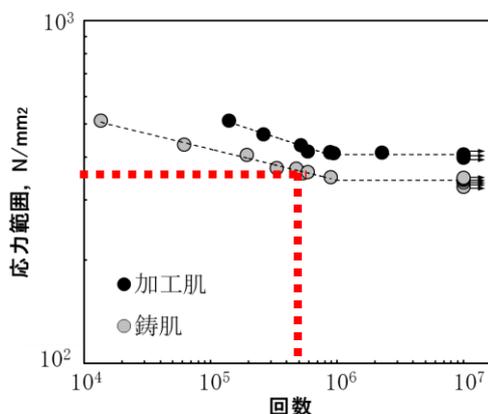


図2-15. 3点曲げ疲労試験（片振幅、FCD550材）

図2-16に示すFEM解析結果で200kN荷重時にリブ先端部に発生する最大主応力は461.3N/mm²である。また昨年の研究よりFEM解析と静的実験で発生する応力値は板厚の違い等により実験値のほうが10%程度低下すること、静荷重実験と動荷重実験で発生する応力値は動荷重実験のほうが2%程度低下することが分かっている。以上のことを踏まえ疲労実験で発生する最大応力は $461.3\text{N/mm}^2 \times 90\% \times 98\% = 406.9\text{N/mm}^2$ となることが推測される。従って最大応力400N/mm²を発生させる最大荷重は $200\text{kN} \times (400\text{N/mm}^2 \div 406.9\text{N/mm}^2) = 196.6\text{kN}$ とし、応力比0.1を考慮した中で振幅荷重は $196.6\text{kN} - 19.7\text{kN} = 176.9\text{kN}$ とした。

また荷重周波数は2Hz、ひずみなどの計測タイミングは繰返し数2.5万回毎、サンプリングタイムは15秒、周波数は100Hzとした。

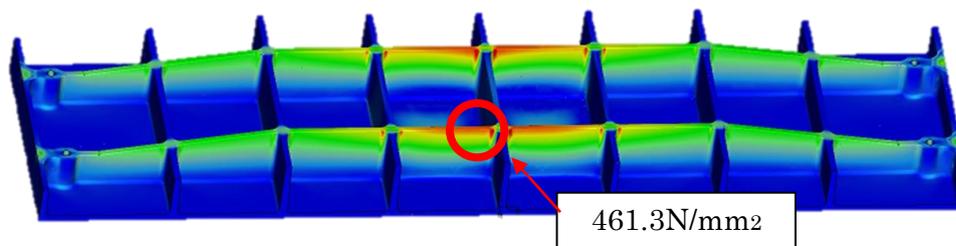


図2-16. 疲労実験のためのFEM解析結果

③実験結果

図2-17に示すよう実験初期段階から最大応力発生部位に近い位置のひずみゲージに発生しているひずみは約2100 μ であり、破壊直前となる60万回まで安定している。この間、図2-19、図2-20に示すよう床版各部位の変位量や載荷荷重にも大きな変化は無いが、60万回を超えた時点で今回破損に至った部位近傍の最大ひずみが2500 μ となり次の測定回数であった62.5万回で主リブの破壊(図2-18参照)に至ったことが記録されている。試験初期段階から最大応力発生部位近傍に発生していた2100 μ のひずみは今回使用した供試体の弾性限(0.2%耐力)ひずみを超えるものである。破壊に至るき裂発生は想定した50万回を超えており、铸铁床版は終局状態においても十分に余裕のある疲労性能を有することが明らかになった。

図2-21に示す疲労実験後の供試体を磁粉探傷検査した結果、破壊に至った主リブ以外の主リブ、副リブ、デッキプレートにき裂などは確認されていない。

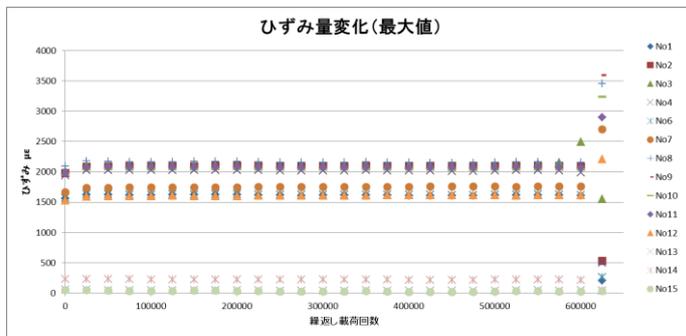


図2-17. 疲労実験結果 ひずみ量変化



図2-18. 疲労実験後の供試体

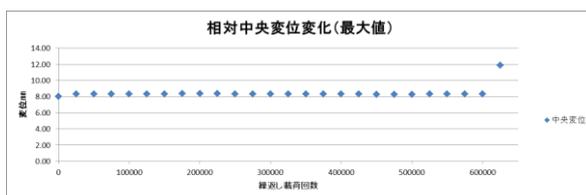


図2-19. 疲労実験結果 変位量変化

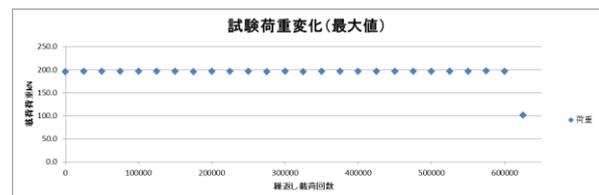


図2-20. 疲労実験結果 載荷荷重変化

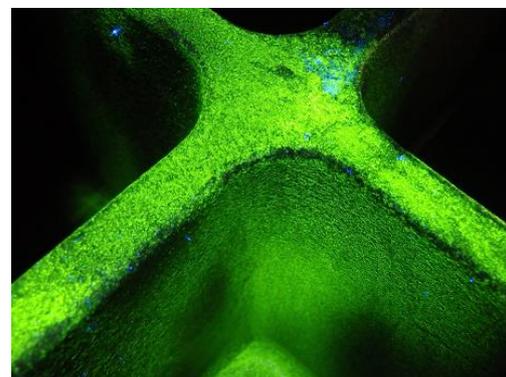
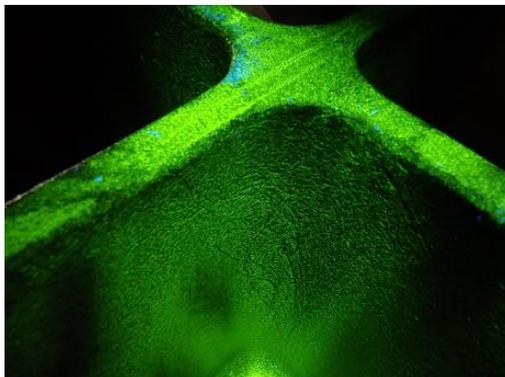


図2-21. 疲労実験後 磁粉探傷検査結果

2-3. 接合部の設計と性能検証

2-3-1. 鋳鉄の摩擦接合用すべり試験

鋳鉄は高力ボルトを使用した摩擦接合が主な接合方法となるため、すべり係数把握のためのすべり試験を土木学会「高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案）」に則り実施した。

①供試体と試験条件

図3-1に供試体図と試験状況、表3-1に連結板と母材および表面処理仕様の組合せを示す。

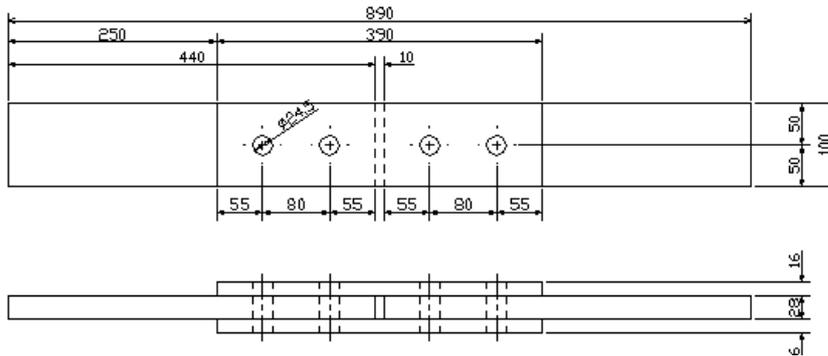


図3-1. すべり係数測定供試体図と試験状況

表3-1. すべり係数測定供試体組合せ

試験体名	連結板				母板				供試体数量
	材料	表面処理			材料	表面処理			
		鋳肌	グリットブラスト	無機ジンク		鋳肌	グリットブラスト	無機ジンク	
SF1	SM	—	○	○	FCD	○	—	—	5
SF2		—	○	○		○	—	○	5
SF3		—	○	○		○	○	○	5
FF1	FCD	○	—	—	FCD	○	—	—	5
FF2		○	—	○		○	—	○	5
FF3		○	○	○		○	○	○	5

②試験結果

表3-2に示す通り、目標とするすべり係数（接触面を塗装しない場合：0.40、接触面に無機ジンクリッチペイントをする場合：0.45）に達したのは以下の3種類の組合せであった。

- ・ SF2：連結板SM材（グリットブラスト＋無機ジンク）/母板FCD材（無機ジンク）
 - ・ SF3：連結板SM材（グリットブラスト＋無機ジンク）/母板FCD材（グリットブラスト＋無機ジンク）
 - ・ FF3：連結板FCD材（グリットブラスト＋無機ジンク）/母材FCD材（グリットブラスト＋無機ジンク）
- この結果から、鋳鉄材は接触面に必要に応じてグリットブラスト処理および無機ジンク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明らかになった。

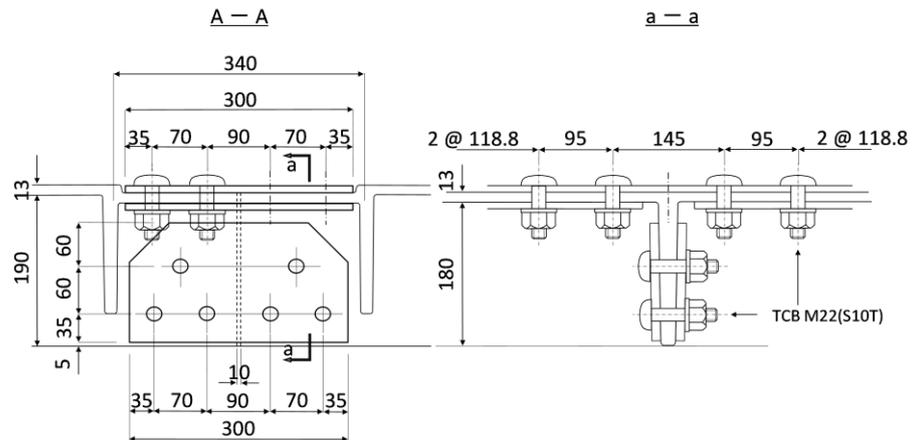
表3-2. すべり係数測定結果

試験体	ホルト軸力			軸力低下率			すべり時 (平均)	すべり荷重 P	すべり係数			標準 偏差	変動 係数	
	締付時 軸力 N_0	試験前 軸力 N_1	すべり時 軸力 N_2	試験前	試験後 (平均)	すべり時			$P/205kN$	P/N_1				
	kN			%			kN	μ_0		平均	μ_1	平均		
SF2	225.6	207.7	197.8	7.9	7.7	4.8	4.9	431.1	0.53	0.49	0.52	0.48	0.038	0.079
	226.6	209.6	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	209.3	199.5	7.7		4.7		391.7	0.48		0.47			
	225.9	208.8	198.2	7.6		5.1		435.6	0.53		0.52			
SF3	225.6	208.0	197.9	7.8	8.2	4.8	5.4	427.2	0.52	0.55	0.51	0.55	0.033	0.060
	228.1	209.9	198.4	8.0		5.5		439.6	0.54		0.52			
	228.6	209.3	198.5	8.4		5.2		469.4	0.57		0.56			
	226.1	207.2	194.4	8.3		6.2		436.3	0.53		0.53			
	226.6	207.3	195.9	8.5		5.5		499.4	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
	228.9	211.9	202.2	7.4		4.6		354.5	0.43		0.42			
	226.3	209.4	198.2	7.5		5.3		398.8	0.49		0.48			
	225.9	209.4	198.6	7.3		5.2		391.6	0.48		0.47			
	226.0	210.8	203.2	6.7		3.6		388.5	0.47		0.46			

2-3-2. 鋳鉄床版の接合ディテール例

前節により、鋳鉄のすべり係数は道路橋示方書で規定された接触面に無機シンクリッチポイントをする場合のすべり係数0.45をクリアしており、一般的な高力ホルト摩擦接合が可能となる。図3-2に道路橋示方書に準じた鋳鉄床版の接合ディテール例を示す。

主リブ継手



パネル端部の接合
(橋軸直角方向)

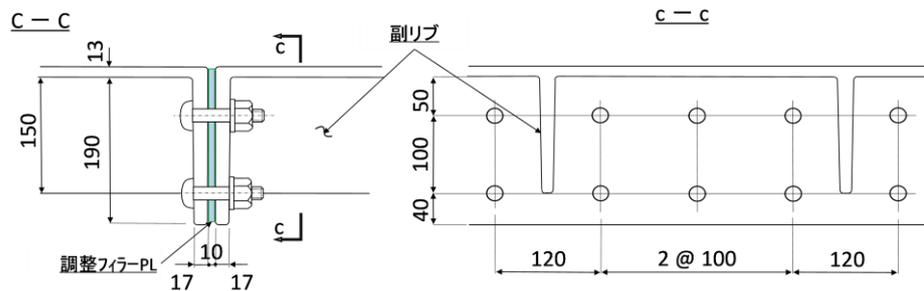


図3-2. 鋳鉄床版の接合ディテール例

2-4. 活荷重による床版および接合部の変形性能

図4-1に示す解析モデルに、図4-2の荷重を載荷して床版の変形性能を確認する。

床版の橋軸方向の接合ラインはG2～G5の桁上とし、橋軸直角方向は橋軸方向に2.3m間隔での接合とした。図4-3、図4-4にその構造を示す。なお、接合材料は棒要素で評価した。

設計諸元

形式：単純活荷重合成桁（鋳鉄床版）

橋長：30.0m、支間長：29.3m

主桁本数：6本、桁高：1.800m

SM490Y 材（主桁）
ヤング率： 2.0×10^5 MPa
ポアソン比：0.30
密度：77.0 kN/m ³
鋳鉄（床版）
ヤング率： 1.7×10^5 MPa
ポアソン比：0.28
密度：71.0kN/m ³

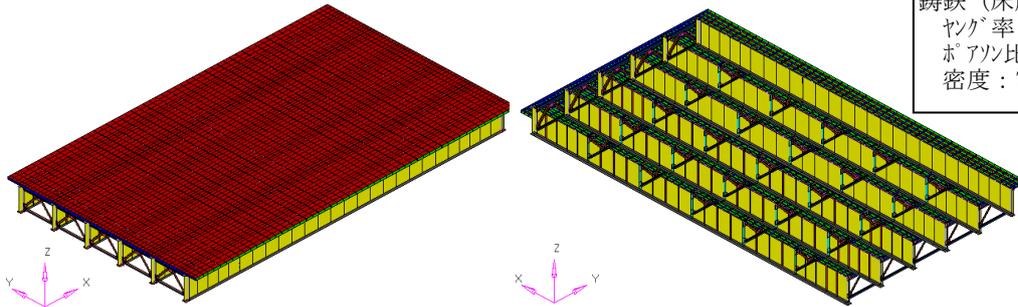


図4-1. 解析モデル

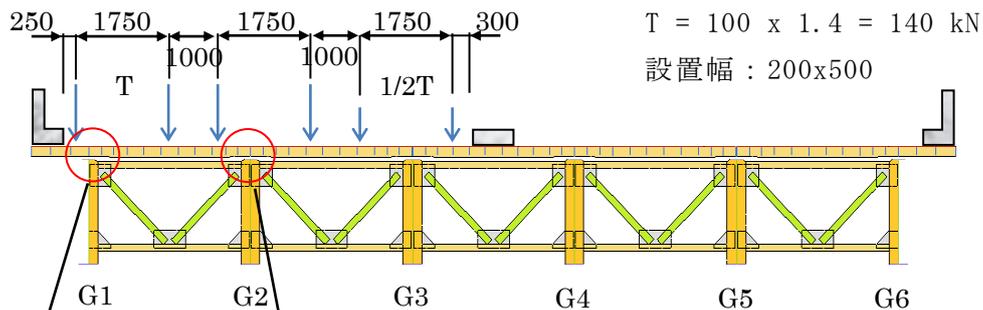


図4-2. 活荷重載荷要領（支間中央）

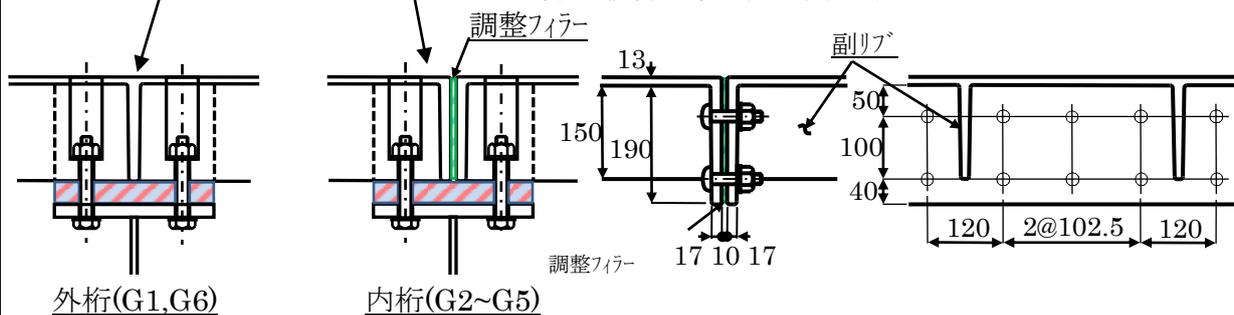


図4-3. 橋軸方向ラインの接合

図4-4. 橋軸直角方向ラインの接合

支間中央における橋軸直角方向断面の床版の変形状況を図4-5に示す。この変形の中で凸となっているG1桁上(R1)と凹となっているG1～G2間(R2)、G2～G3間(R3)主リブ上の曲率半径を算出した結果を表4-1に示す。デッキプレート厚13mm、主リブが橋軸直角方向であること、副リブピッチが325mmなどの影響でデッキプレートの曲率半径は大きな値となっている。なお、道路橋示方書の鋼床版の解説における舗装への影響の少ない変形としては曲率半径の一例を20mとしている。

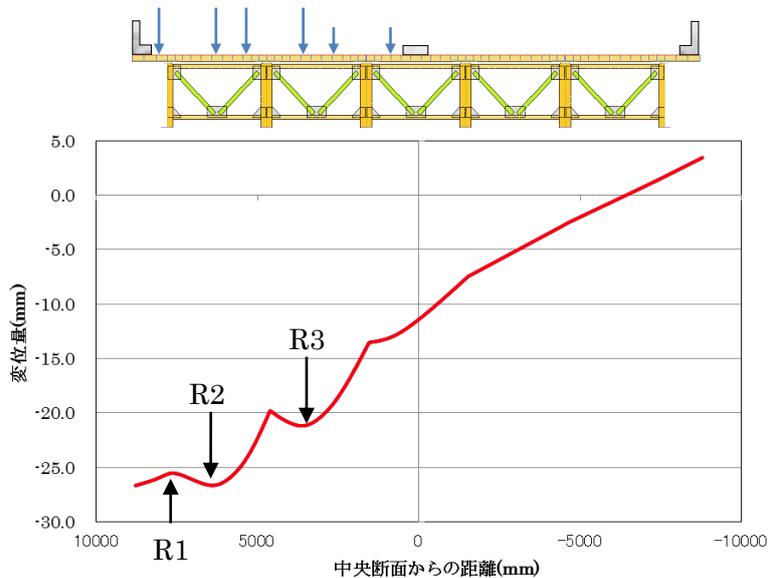


図4-5. 曲率半径

表 4-1. 曲率半径

箇所	曲率半径 (m)
R1	191.2
R2	203.9
R3	227.9

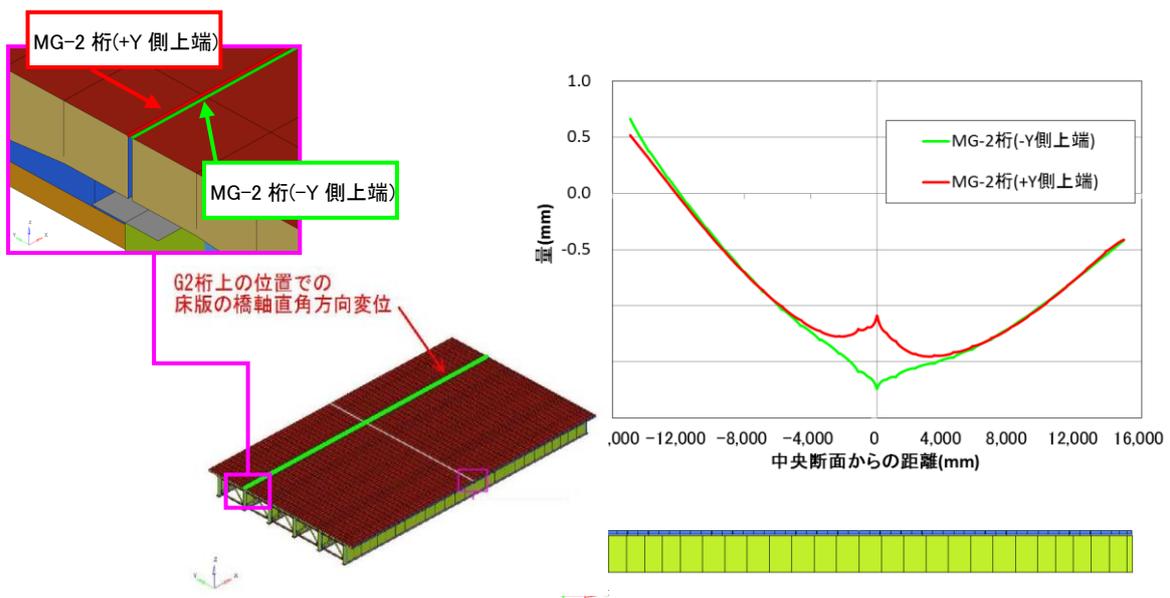


図 4-6. 目開き量 (G2 桁上)

図 4-2 の G2 桁上、G3 桁上においては、床版が単純支持構造となっていることから床版接合部で角折れが発生している。G2 桁上のデッキプレートの状況を橋軸方向について示したものが図 4-6 である。支間中央部の床版上面位置で 0.7mm の目開きが発生している。

以上の結果より、鋳鉄床版は鋼床版と同等のたわみ性能を有していることが確認できた。道路橋示方書の鋼床版の曲率半径の規定は舗装の耐久性を考慮したものであり、鋳鉄床版も鋼床版と同等の性能を有しているといえる。

ただし、橋軸方向の接合ラインはたわみ曲線で角折れし目開きが生じており、今後の検討において目開き、角折れが生じない構造の検討あるいは対策を講じていく予定である。

2-5. 最適鑄鉄材料の選定と量産に向けた鑄造プロセスの確立

2-5-1. 目的

昨年度は適用材質として 550N/mm² 級球状黒鉛鑄鉄 (FCD550) を選定し、市販の鑄造シミュレーションソフト (MAGMA 社・MAGMASOFT) を用いて、鑄鉄床版の鑄造における鑄型内の熱・流体・凝固解析を行い、健全鑄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・鑄込み法を検討し、床版鑄物の試作・検証を行った。今年度は、床版のさらなる軽量化を実現させるための「高張力鑄鉄」およびより変形性能および靱性を向上させるための「高延性鑄鉄」を対象に、所定の実体強度を実現するため、鑄造品の強度・ミクロ組織に及ぼす化学成分、特に Cu の影響を研究した。具体的には、高強度材として FCD700 を選定し、実大モデル鑄鉄床版を鑄造した。得られた鑄鉄床版鑄物から試験片を採取し、昨年度の FCD550 と同様に引張試験および三点曲げ疲労試験を行った。

2-5-2. 試作条件

昨年度の実績に基づいて若干の修正を加えた鑄造方案により、実大モデル鑄鉄床版として高強度の 700N/mm² 級 (FCD700) の球状黒鉛鑄鉄を昨年度同様のワン自硬性鑄型に鑄造した。

2-5-3. 鑄鉄床版実体の組織制御技術の確立

球状黒鉛鑄鉄の強度は化学成分や冷却速度の影響を受ける。化学成分の中でも特に、Cu はパーライトの生成を促し、球状黒鉛鑄鉄の強度をコントロールするために添加される主要元素であり、鑄造品の冷却速度に応じて適切に管理する必要がある。そこで、床版鑄物を目標とする強度に制御するため、Cu 量を 0.26~0.81% の範囲で変化させた試料を作製し、強度を左右するパーライト面積率に及ぼす Cu 量と冷却速度の影響を調査した。

鑄鉄床版鑄物および Yブロック (説明) から試験片を採取し、DTA 装置 (説明) 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。その際に得られた共析変態過程の測定結果 (CCT 曲線 (連続冷却変態曲線)) を図 5-1~図 5-4 に示す。

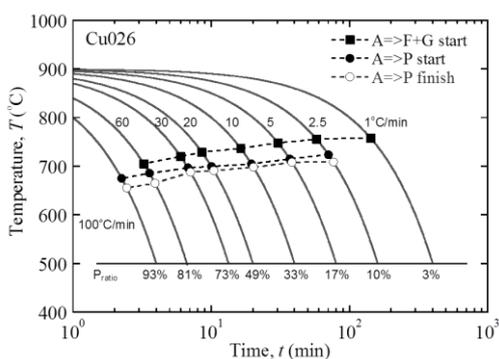


図 5-1. CCT 曲線 Cu0.26%

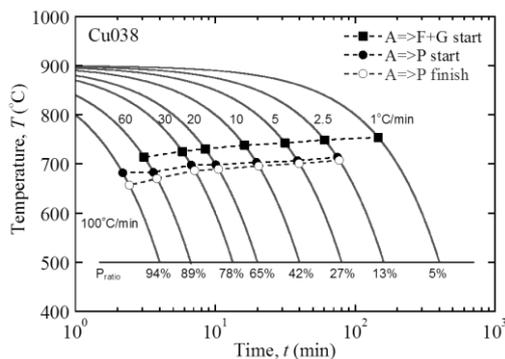


図 5-2. CCT 曲線 Cu0.38%

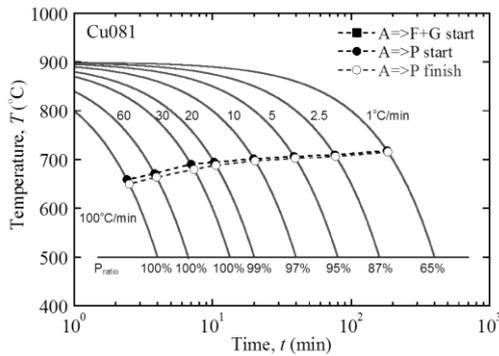


図 5-3. CCT 曲線 Cu0.47%

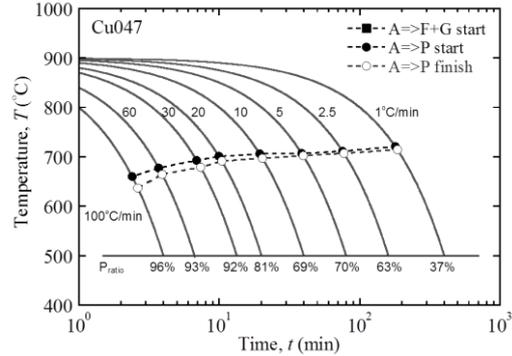


図 5-4. CCT 曲線 Cu0.81%

冷却パラメータとして900°Cから700°Cまでの冷却速度 $CR_{9/7}$ を求め、パーライト率との関係で整理した結果、図 5-5. に示すように $CR_{9/7}$ とパーライト率はよい相関関係にあり、 $CR_{9/7}$ が増大するほどパーライト率が増加し、また、Cu 量の増加に伴ってパーライト化が進むことがわかる。

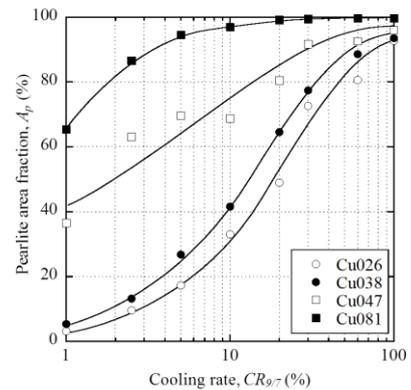


図 5-5. 冷却速度とパーライト面積率の関係

ここで、図 5-6 に示す引張強さに及ぼすパーライト面積率の影響より、床版鋳物におけるリブの冷却速度である 10°C/min における Cu 量とパーライト率および引張強さの関係を図 5-7 に示す。図 5-7 より、床版鋳物の特定部位における強度を制御するためには、当該部位の冷却速度を MAGMASOFT で予測し、Cu 量、パーライト面積率、引張強さとの相互関係より Cu 量を決定出来ることがわかる。なお、実際の鋳物では黒鉛粒数やその他の微量元素の影響も受けるが、それらは本研究で得られた結果をもとに補正することができる。これらの実験結果から FCD700 の鋳鉄床版には Cu を 0.8% 添加することが適当であることが判明した。

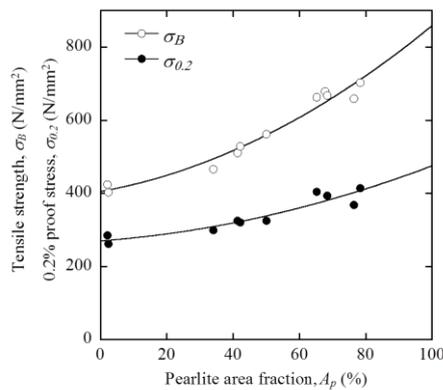


図 5-6. 引張強さに及ぼすパーライト面積率の影響

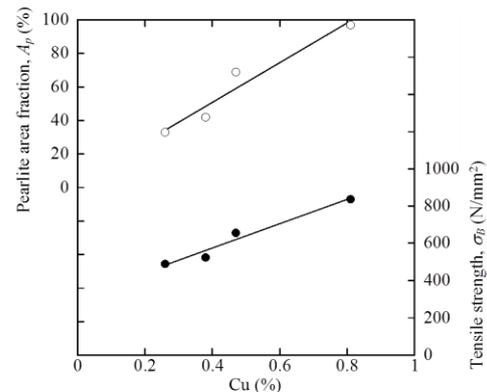


図 5-7. Cu 量とパーライト率および引張強さの関係

2-5-4. 試作品の機械的特性（引張り試験）

FCD700 で製造した鋳鉄床版において、昨年度同様に床版のリブ部より試験片を採取し、引張試験を実施した。床版実体からの試験片の採取位置を図 5-8、図 5-9 に、試験片の形状を図 5-10 に示す。試験片は JIS14A 号を使用し、試験条件は JISZ2241 に準拠し引張速度は 0.5mm/min とした。

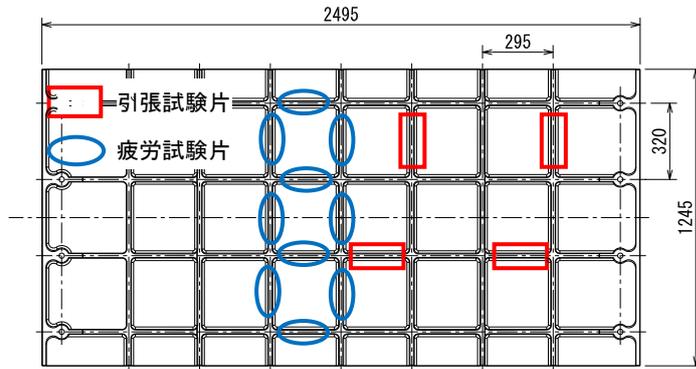


図 5-8. 床版実体からの試験片採取位置

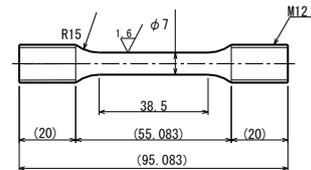


図 5-10. 引張試験片寸法

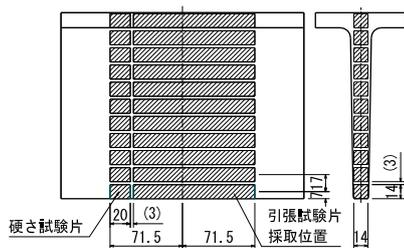


図 5-9. 実体切出し品からの引張試験片採取位置

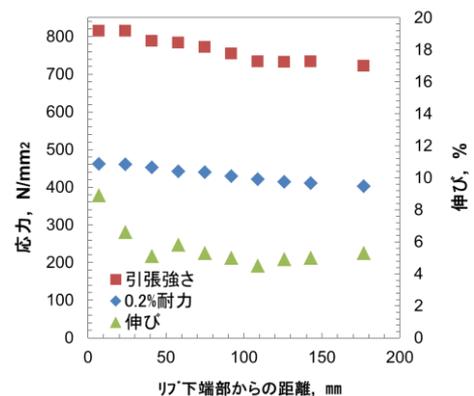


図 5-11. 採取場所ごとの引張試験結果

採取場所ごとの引張試験結果を図 5-11. に示す。引張強さ、0.2%耐力、伸びとも、いずれの部位においても所定の値を確保している。

2-5-5. 試作品から採取した鋳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鋳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 5-8 に疲労試験用リブの採取位置を示す。図 5-12 に示すように、リブ先端より鋳肌付きの試験片を 2 本採取し一体は鋳肌のままで、一体は機械加工をして疲労試験を実施した。供試体の形状を図 5-13 に示す。試験条件は、応力比：0.1、周波数：25Hz、試験温度：24℃、試験機は電気油圧サーボ式試験機（図 5-14）を使用した。

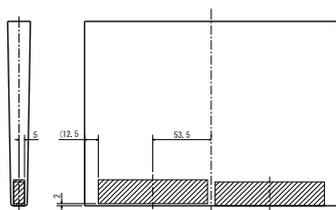


図 5-12. 3 点曲げ疲労試験片採取位置

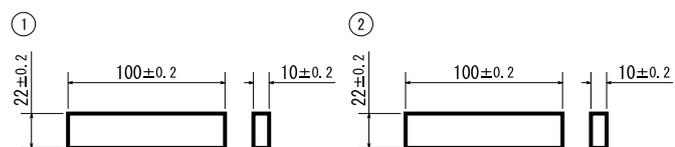


図 5-13. 試験片形状（左：鋳肌付き、右：加工肌）

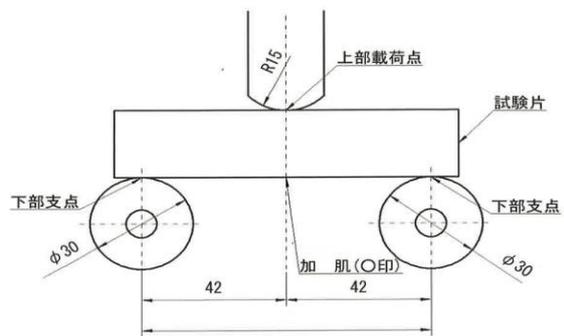


図 5-14. 3 点曲げ疲労試験

試験結果を図 5-15 に示す。床版鋳物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 1~2 割程度低下し、既往の文献とも合致する。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を推定できる。

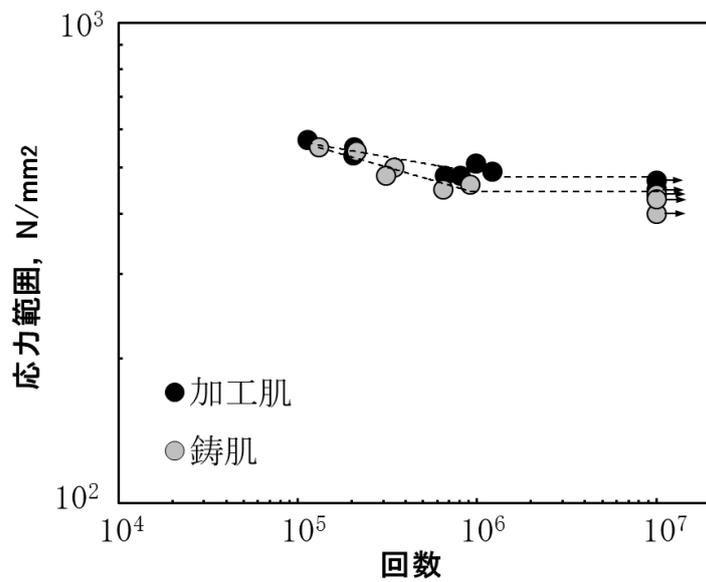


図 5-15. 鋳肌、加工肌試験片 S-N 曲線 (3 点曲げ、片振幅、FCD700 材)

⑦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および国際会議、学会等における発表等があれば記入。)

- 1) 植村尚子, 山口栄輝, 佐伯英一郎, 村山稔, 飛永浩伸: 鋳鉄床版における補剛リブに関する検討, 土木学会西部支部, 2016年3月

⑧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。)

実務への適用

- ・ 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

研究期間終了後の展開

- ・ 実環境下における疲労き裂等の性能検証
- ・ 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

⑨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。)

H27年度は⑥これまでの研究経過に示す2-1～2-5項を実施し、その成果を下記に示す。

- ・ 鋳鉄床版のリブ配置、リブ断面等の最適化を完了した
- ・ 静的弾塑性加力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した
- ・ 接合部の摩擦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した
- ・ 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

当初研究計画に掲げた研究目的と目標はほぼ順調に達成出来ていると考える。

道路橋示方書に則った接合ディテールはボルト本数が多く施工性の面で課題がある。次年度以降の研究においては鋳鉄の特長を活かした新しい接合形式の研究に取り組んでいく予定である。