



道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 26-5

研究テーマ

高性能鋳鉄床版の開発

研究代表者：	九州工業大学 副学長	山口 栄輝
共同研究者：	東京都市大学 学長	三木 千壽
	九州工業大学 教授	惠良 秀則
	日之出水道機器株式会社	大城 桂作
	日之出水道機器株式会社	聖生 守雄
	日之出水道機器株式会社	笠原 一浩
	日之出水道機器株式会社	村山 稔
	日之出水道機器株式会社	飛永 浩伸
	日之出水道機器株式会社	梅谷 拓郎

平成 30 年 7 月

新道路技術会議

目次

研究概要（様式 3）	1
第 1 章 はじめに	3
1.1 研究の背景	3
1.2 研究の目的	3
1.3 研究の実施体制	3
第 2 章 鋳鉄床版の設計	4
2.1 設計クライテリア	4
2.2 基本設計	4
2.3 詳細設計	8
第 3 章 鋳鉄床版の製造	12
3.1 製造検討フロー	12
3.2 鋳造シミュレーションの予測精度向上	12
3.3 組織制御技術の確立	14
第 4 章 鋳鉄床版材料（球状黒鉛鋳鉄）の特性	15
4.1 機械特性	15
4.2 鋳肌付き試験片の疲労特性	17
第 5 章 鋳鉄床版の力学特性	18
5.1 静的載荷試験	18
5.2 定点繰返し載荷試験	21
5.3 輪荷重走行試験	23
5.4 落錘衝撃試験	27
第 6 章 鋳鉄床版の施工性、維持管理性と適用範囲	29
6.1 施工性	29
6.2 維持管理性	32
6.3 適用範囲	34
第 7 章 まとめ	41
7.1 研究により得られた成果	41
7.2 研究成果の活用方策	42
添付資料	43
参考文献	49

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成 26 年度採択)
研究概要

番号	研究課題名	研究代表者
No. 26-5	高性能鋳鉄床版の開発	九州工業大学 教授 山口栄輝

老朽化した道路橋床版の更新事業に寄与する道路橋床版を実現するため、軽量でかつ疲労耐久性の高い床版開発を目的として、普通鋼と同等の材料性能を持ち、自由成形が可能な球状黒鉛鋳鉄を用いた床版の設計手法の検討を行い、強度、疲労性能を評価し、実橋適用検討を実施する研究開発

1. 研究の背景・目的 (研究開始当初の背景・動機、目標等)

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。古い橋梁の橋脚及び基礎は耐震性が不十分なものが多いため、床版の更新に鋼床版を採用すれば RC 床版と比較して重量が軽く耐震性の向上を図れるなどのメリットを有するが、溶接部の疲労損傷が課題である。

古い橋梁の床版取替えにおいて、耐震性と疲労損傷の課題を共に解決するためには、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。

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。

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、かつ経済的な鋳鉄製床版の実用化に向けた開発を目的としている。

2. 研究内容 (研究の方法・項目等)

- 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 TP の機械的性質、疲労性能の評価
- ④ 力学性能の検証と評価
- ⑤ 鋳鉄床版の最適形状の開発
- ⑥ 接合部の設計と性能検証
- ⑦ 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
- ⑧ 品質管理項目と検査方法の検討
- ⑨ 鋳鉄床版の適用性の検証

3. 研究成果 (図表・写真等を活用し分かりやすく記述)

- ・ FEM を用いて試設計を実施。重量は単位面積当たり 2.45kN/m^2 となり RC 床版よりも軽量化できることが確認できた。また、実際に鋳造を行い、製造可能であることを確認した。(図 1)
- ・ 試作した鋳鉄床版の各部位の材料評価を行い、引張強度、伸び、硬さを計測した。大きなバラツキはみられなかった。
- ・ 静的荷重試験を行い、T 荷重の 2 倍以上となる 287kN から塑性変形が始まる事が確認でき、T 荷重の 9 倍となる 941kN まで載荷したが、供試体にクラック等の損傷はみられず、十分な耐荷性能を確認できた。
- ・ 定点繰り返し載荷試験を行った。鋳鉄床版の最大発生応力を許容応力となるように試験荷重を調整し、累計 1000 万回の載荷試験を実施。発生応力、変位は安定しており、微小なクラックや損傷はみられず、十分な疲労耐久性を確認できた。(図 2)

- ・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，実橋適用に向け十分な疲労性能を有することを確認した。（図3）



図1 鑄鉄床版試作品



図2 定点繰り返し載荷試験



図3 輪荷重走行試験

4. 主な発表論文（研究代表者はゴシック、研究分担者は下線）

- 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)

5. 今後の展望（研究成果の活用や発展性、今後の課題等）

- ・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鑄鉄床版の適用
- ・本成果の量産製造技術及び品質管理への活用
- ・鑄鉄の持つ優れた疲労特性を活かした他の土木構造物への鑄鉄適用の展開

6. 道路政策の質の向上への寄与（研究成果の実務への反映見込み等）

本研究では，高性能鑄鉄床版の実橋適用を目的に，各種検証試験を実施してきた。結果，道路橋床版に球状黒鉛鑄鉄を活用する事で，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で十分に実橋に適用できるものと評価し，床版の更新事業において，構造の一つとしてエントリーされるものと考えている。

7. ホームページ等（関連ウェブサイト等）

なし

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

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。¹⁾ 古い橋梁の橋脚及び基礎は耐震性が不十分なものが多いため、床版の更新に鋼床版を採用すればRC床版と比較して重量が軽く耐震性の向上を図れるなどのメリットを有するが、溶接部の疲労が課題である。²⁾

古い橋梁の床版取替えにおいて、耐震性と疲労損傷の課題を共に解決するためには、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。^{3) 4) 5)}

1.2 研究の目的

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し、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、標準化などでロットを大きくすることにより、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、かつ経済的な鋳鉄製床版の実用化に向けた開発を目的としている。

1.3 研究の実施体制

表1-1 実施体制

氏名	所属 役職
山口 栄輝 (研究代表)	九州工業大学 副学長
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 R&D総合センター顧問
聖生 守雄	日之出水道機器 技師長
笠原 一浩	日之出水道機器 土木MKT 課長
村山 稔	日之出水道機器 土木MKT マネージャー
飛永 浩伸	日之出水道機器 技術開発 マネージャー
梅谷 拓郎	日之出水道機器 研究開発 マネージャー

第2章 鋳鉄床版の設計

2.1 設計クライテリア

床版の必要性能を満足し最も経済的な形状とするため三次元有限要素法（FEM 解析）を用いて開発を進めた。

使用した設計基準強度と荷重および設計クライテリアを以下に示す。

(1) 設計基準強度

- ・耐力：350N/mm²
- ・許容応力度：205N/mm²（「耐力/1.7」）

(2) 荷重

- ・活荷重：T 荷重 100kN
- ・衝撃係数：0.4

(3) 設計クライテリア

- ・発生応力：許容応力度 205N/mm² 以下
- ・たわみ量：「支間長 L/500」 以下
- ・デッキプレート曲率半径：20m 以上

2.2 基本設計

検討を行う鋳鉄床版のデッキ下面のリブ配置を図2-1に示す。走行方向直角方向に配すリブを主リブ、走行方向に配すリブを副リブとし、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。

(1) 解析条件、材料定数、拘束条件

主リブや副リブの発生応力が最大となるデッキプレート上の荷重位置を、図 2-2 に示すよう (a)～(d) と想定した中、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ため、より厳しい条件となる「間隔 950mm」を荷重位置とした。また、荷重面積は 200mm×500mm、荷重荷重は 140kN（等分布荷重）とした。

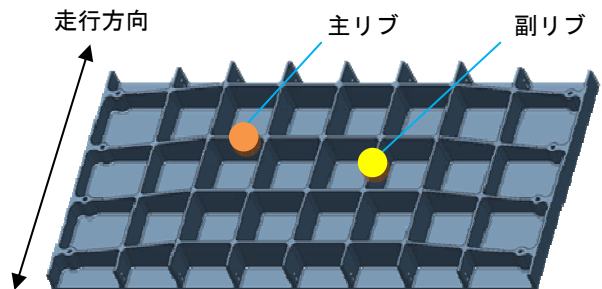


図2-1 鋳鉄床版リブ配置

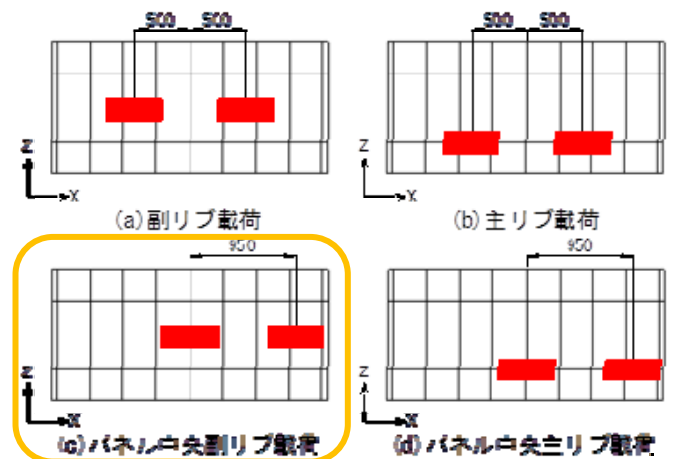


図2-2 荷重位置

材料定数を表2-1, 拘束条件を図2-2に示す.

(2) 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2-3に示す. ここでデッキプレート寸法は既存設備で製造可能な最大サイズ, デッキプレート厚みは, 既存鋼床版の板厚を参考に, 最大サイズの鋳鉄床版を製造する上で必要と想定される板厚を適用した.

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

(3) リブ配置間隔とリブ断面の最適化

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. 先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を行った.

表1-3に主リブ間隔640mm, 副リブ間隔300mmのケースでの解析事例を示す. 表中の数値は鋳鉄床版の単位橋面積当たり重量 (kgf/m^2) 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.

表2-1 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

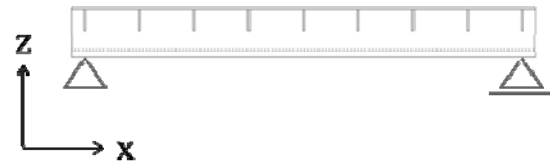


図2-2 拘束条件

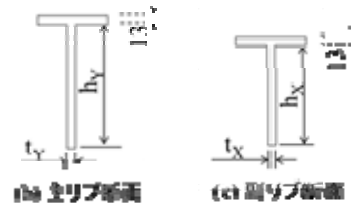
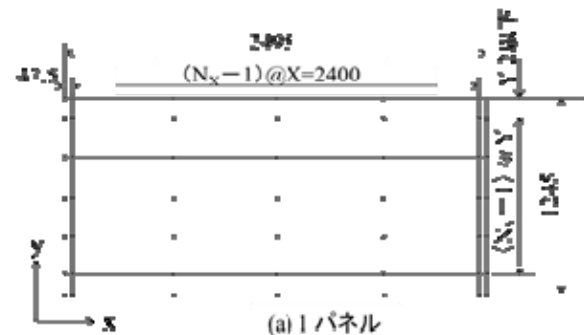


図2-3 検討パラメータ

表2-2 主リブ, 副リブ間隔の組合せ

間隔 (mm)	主リブ						副リブ						
	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2-3 主リブ間隔640mm, 副リブ間隔300mm解析事例

副リブ高さ h_X (mm)	主リブ高さ h_Y (mm)							
	300	190	180	170	160	150	140	130
170	209.3	204.9	208.9	197.8	192.4	x	x	x
160	201.4	197.8	193.8	189.8	182.5	x	x	x
150	193.5	189.1	185.1	181.2	172.6	x	x	x
140	186.5	182.1	178.1	174.2	x	x	x	x
130	179.6	175.2	171.3	x	x	x	x	x
120	173.6	x	x	x	x	x	x	x
110	x	x	x	x	x	x	x	x
100	x	x	x	x	x	x	x	x

同様の方法でその他のケースでの解析を行い、その結果を表 2-4～表 2-6 に示す。

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 の場合で単位あたり重量 171.3kgf/m²となった。本結果は、接合を考慮した形状、接合部の重量、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。

次に、鋳鉄床版の製造上、リブにはリブ下端部からデッキプレート下面に向かって1°の勾配が付くため、この勾配を反映した解析モデルを用い、配置数が多い副リブに着目し、表2-7に示す組合せで副リブ配置間隔と副/主リブ断面の最適化についてFEM解析を行った。

表 2-8～表 2-10 に解析結果を示す。表中の数値は 1m² 当たりの床版重量を示し、赤字の×印は副リブで許容値を満たさず、青字の×印は主リブで許容値を満たさないことを示している。また、黒字の×印は赤字と青字で×印となった副リブ/主リブ断面より小さくなることから許容値を満たさないと判断した。なお、ここではコーナーRは 0mm で検討を行ったが、表中でオレンジでハイライトした最小重量の床版を対象に、後程コーナーRの最適化を行った。

表 2-4 リブ断面最適化時の鋳鉄床版重量(kgf/m²)

副リブ間隔 (mm) 【本数】	主リブ間隔(mm) 【本数】						
	1245	700	640	420	320	260	220
	【1】	【2】	【2】	【3】	【4】	【5】	【6】
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 2-5 リブ断面最適化時の主リブ高さ (mm)

副リブ間隔 (mm) 【本数】	主リブ間隔(mm) 【本数】						
	1245	700	640	420	320	260	220
	【1】	【2】	【2】	【3】	【4】	【5】	【6】
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 2-6 リブ断面最適化時の副リブ高さ (mm)

副リブ間隔 (mm) 【本数】	主リブ間隔(mm) 【本数】						
	1245	700	640	420	320	260	220
	【1】	【2】	【2】	【3】	【4】	【5】	【6】
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			

表 2-7 考察対象とした副リブ本数(間隔)と副リブ/主リブ高さの組合せ

本数(本) 間隔(mm)	副リブ		
	10	11	12
	266.7	240.0	218.2

高さhx(mm)	副リブ					
	100	110	120	130	140	150

高さhy(mm)	主リブ					
	150	160	170	180	190	200

表 2-8 副リブ 10 本の解析結果 (床版重量 kgf/m²)

副リブ高さ h ₂ (mm)	主リブ高さ h ₁ (mm)						
	200	190	180	170	160	150	
	150	221.6	216.6	211.7	207.0	202.7	×
140	212.0	207.0	202.0	197.4	193.0	×	
130	203.1	198.0	193.1	188.4	×	×	
120	194.3	189.2	184.3	180.1	×	×	
110	×	×	×	×	×	×	
100	×	×	×	×	×	×	

表 2-9 副リブ 11 本の解析結果 (床版重量 kgf/m²)

副リブ高さ h ₂ (mm)	主リブ高さ h ₁ (mm)						
	200	190	180	170	160	150	
	150	228.9	224.0	219.1	214.4	×	×
140	218.4	213.4	208.5	203.8	×	×	
130	208.6	203.6	198.6	194.0	×	×	
120	199.5	194.5	189.5	×	×	×	
110	×	×	×	×	×	×	
100	×	×	×	×	×	×	

表 2-10 副リブ 12 本の解析結果 (床版重量 kgf/m²)

副リブ高さ h ₂ (mm)	主リブ高さ h ₁ (mm)						
	200	190	180	170	160	150	
	150	236.3	231.3	226.5	221.8	217.5	×
140	224.8	219.8	214.9	210.3	205.9	×	
130	214.1	209.1	204.2	199.5	195.1	×	
120	204.2	199.2	194.2	189.5	×	×	
110	195.3	190.4	185.3	180.8	×	×	
100	×	×	×	×	×	×	

(4) コーナーRの最適化

コーナーRは鋳物を製造する際は比較的任意にか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、またコストアップにつながり、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ため、図2-4に示すC1~C4対象にコーナーRの最適化を検討した。

対象となるC1~C4の中から、橋面積当たりのコーナーRの配置長さが最も長くなるデッキプレートと副リブの付け根C1に着目し、曲率半径Rの寸法を10~20mmの範囲でFEM解析による検討を行った。

表2-11に副リブ間隔/本数と曲率半径Rが0mm, 10mm, 20mmの組合せに対し、床版重量とFEM解析で得られたC1部の発生応力を示す。なお、C1部は圧縮応力領域であることから最小主応力で評価した。製造難易度が高く、コストアップとなる曲率半径R=0mmの条件は比較参照として置いた上で、表2-11より、発生する最小主応力が許容値を満たし、かつ最適化の主眼として置いた床版が最小重量となるのは、副リブ12本（副リブ間隔218.2mm）、曲率半径R10mmの場合とわかる。

次に、この床版において、さらに曲率半径Rを8mm, 9mmとして検討を加えた結果を表2-12に示す。表2-12を見ると、曲率半径Rを9mmまで小さくしても、応力は許容値を満たす。また他のコーナー部C2~C4の応力は小さくなく、床版製作上の最小曲率半径Rを有したコーナーで要求性能を満足する。

リブ下端部のコーナーRを3mmにした解析結果を図2-5に示す。最大応力はリブ下端部で201.3N/mm²であった。リブ下端部のコーナーRは断面欠損という面があるが、一方で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による早期発錆防止効果が期待できる。

(5) まとめ

鋳鉄床版の基本設計は、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し、リブ下端部のコーナー部の曲率半径は3mmとすることとした。

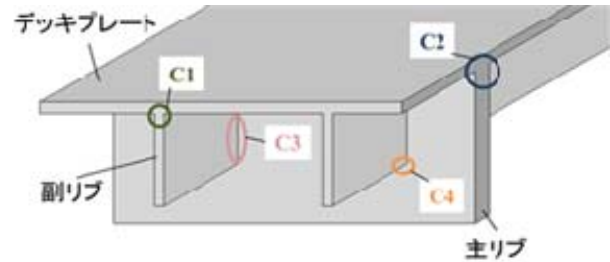


図2-4 コーナーR最適化の対象部位

表 2-11 床版重量と発生応力

副リブ' 間隔 X (mm) 本数 [Nx]	R0		R10		R20	
	床版重量 (kgf/m ²)	最小主応力 (N/mm ²)	床版重量 (kgf/m ²)	最小主応力 (N/mm ²)	床版重量 (kgf/m ²)	最小主応力 (N/mm ²)
300 [9]	187.6	-400.6	188.6	-276.8	191.7	-216.7
266.7 [10]	180.1	-345.7	181.1	-221.8	184.6	-
240 [11]	189.5	-266.6	190.8	-193.2	194.5	-
218.2 [12]	180.8	-249.8	182.0	-160.9	186.1	-
200 [13]	189.5	-183.4	190.9	-143.1	195.4	-

表 2-12 曲率半径 R の最適化結果

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

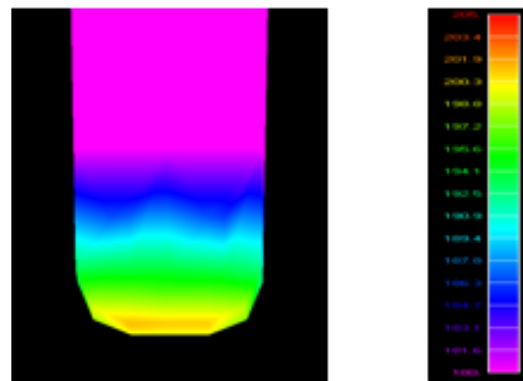


図 2-5 リブ下端コーナーR=3mm 解析結果

2.3 詳細設計

前述2.2節にて、鋳鉄床版の基本設計を示したが、本節では実橋適用に向け、新たに量産設備での鋳鉄床版の製造可能サイズ、施工現場へのトラック輸送効率を検討条件に加え、鋳鉄床版サイズ、製造した鋳鉄床版の床版間／主桁間の接合構造について詳細設計を行った。

(1) 鋳鉄床版の寸法制約条件

複数枚の鋳鉄床版を接合した架設ブロックのサイズを輸送トラックの荷台幅から橋軸方向2.3m、橋軸直角方向を10m程度と考え、鋳鉄床版単体の橋軸方向の長さは架設ブロック幅の半分の1150mmとし、橋軸直角方向の長さは、量産時の設備制約より2000mm以下とした。

(2) 高力ボルト摩擦接合のためのすべり試験

鋳鉄は難溶接の材料であるため、接合構造は高力ボルトを使用した摩擦接合で検討を進めた。検討にあたり、摩擦接合に必要なすべり係数把握のためのすべり試験にて摩擦接合面の処理条件を明らかにした。

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、図2-6に示す試験

体を用い、表2-13に示す表面処理条件の組合せですべり試験を行った。

表2-14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）を確保するためには、鋳鉄材の接触面に必要に応じグリッドブラスト処理および無機ジンクリッチペイントを塗装することにより、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。

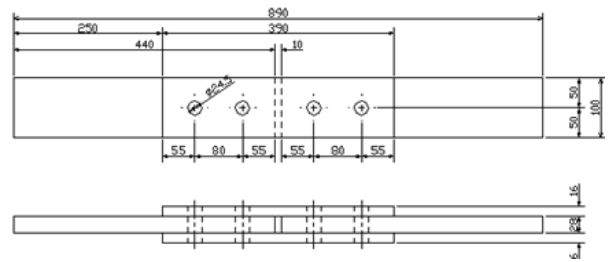


図2-6 すべり試験体図と試験状況

表2-13 すべり試験 表面処理条件組合せ

試験体名	連軸板			母板			供試体数量		
	材料	表面処理		FCD	表面処理				
		鋳肌	グリッドブラスト		無機ジンク	鋳肌		グリッドブラスト	無機ジンク
SF1	SM	-	○	○	SM	○	-	-	5
SF2		-	○	○		○	-	○	5
SF3		-	○	○		○	○	○	5
FF1	FCD	○	-	-	FCD	○	-	-	5
FF2		○	-	○		○	-	○	5
FF3		○	○	○		○	○	○	5

表 2-14 すべり試験結果

試験体	ボルト軸力			軸力低下率			すべり荷重	すべり係数					標準偏差	変動係数
	締付時	試験前	すべり時	試験前	試験後(平均)	すべり時		P	P/205kN		P/N ₁			
	軸力N ₀	軸力N ₁	軸力N ₂				すべり時(平均)		μ ₀	平均	μ ₁	平均		
	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			
	228.7	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		468.4	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	209.1	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			

(3) 接合部設計

小パネルで製造した鋳鉄床版を一体化構造とするため、図2-7に示す橋軸方向接合線、橋軸直角方向接合線の接合構造の検討を行った。

橋軸直角方向接合線継手は、道路橋示方書（平成24年3月）に準じ、全強の75%で設計した。⁶⁾ 橋軸方向継手は、副リブ1本に1輪の荷重が作用するものとして設計を行った。

a) 設計方針

設計曲げ応力度 : $\sigma = 0.75 \times \sigma_a$
 せん断力 : $S = T \times (1 + i) = 140 \text{ kN}$
 : $T = 100 \text{ kN}$ (活荷重 : T 荷重)
 : $i = 0.4$ (縦リブの衝撃係数)

b) 設計諸条件

実橋適用時に想定する鋳鉄床版の諸条件を以下に示す。

鋳鉄床版

床版支間長 : 3000mm
 デッキ厚み : 13mm
 主リブ間隔 : 0.573m
 主リブ断面 : 190mm × 20mm (平均厚み)
 副リブ間隔 : 0.333m
 副リブ断面 : 150mm × 17mm (平均厚み)
 耐力 σ_{yFCD} : 350N/mm² (0.2%耐力)
 許容応力度 σ_{aFCD} : 205N/mm² ($\sigma_{yFCD}/1.7$)

継手材料 (高力ボルト M22/S10T)

(接触面に無機ジンクリッチペイント塗布)

許容力 ρ_a (一面摩擦) : 54kN
 許容力 ρ_a (二面摩擦) : 108kN

添接板 (SM490Y)

許容応力度 σ_{aSPL} : 210N/mm²

c) 橋軸直角方向接合線継手の設計

橋軸方向接合線継手は、デッキ面の継手と主リブの継手、2箇所設計を行った。

デッキ面の継手

設計応力度 σ : 全強の75%とすることから

$$\sigma = 0.75 \times \sigma_{aFCD}$$

$$= 153.8 \text{ N/mm}^2$$

デッキ作用力 P :

$$A_d = \text{有効幅} \times \text{板厚}$$

$$= 385 \times 13$$

$$= 5005 \text{ mm}^2$$

$$P = A_d \times \sigma$$

$$= 5005 \times 153.8$$

$$= 770 \text{ kN}$$

必要ボルト本数 n_{req} :

$$n_{req} = P / \rho_a \text{ (二面摩擦)}$$

$$= 770 / 108$$

$$= 7.1 \text{ 本}$$

ボルト配置本数 (有効幅内)

$n = 8 > n_{req}$ …有効幅内に必要本数が配置されているので OK

添接板有効断面 A_{dSPL}

上面側有効断面 = 有効幅 × 板厚 × 1 枚

$$= 385 \times 9 \times 1$$

$$= 3465 \text{ mm}^2$$

下面側有効断面 = 有効幅 × 板厚 × 2 枚

$$= 157.5 \times 9 \times 2$$

$$= 2835 \text{ mm}^2$$

$A_{dSPL} = \text{上面側有効断面} + \text{下面側有効断面}$

$$= 6300 \text{ mm}^2$$

$$> A_d \cdots \text{OK}$$

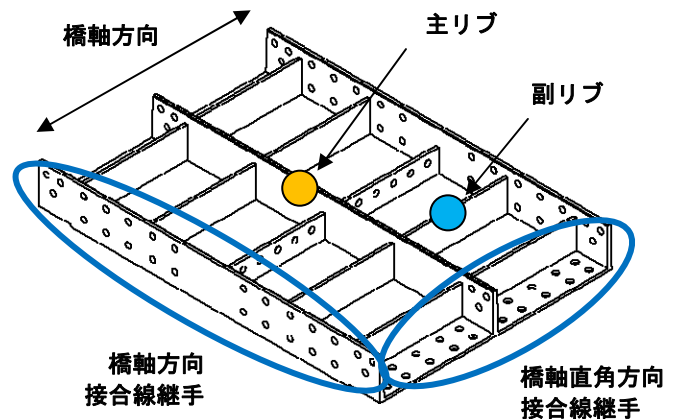


図2-7 接合構造図 (デッキ下面側)

主リブの継手

ボルトに作用する力

$$P_{m1} = (153.8 + 80.7) / 2 \times 70 \times 20$$

$$= 164.1 \text{ kN}$$

$$P_{m2} = (80.7 + 0) / 2 \times 77.4 \times 20$$

$$= 62.5 \text{ kN}$$

必要ボルト本数

$$n_{1\text{req}} = P_{m1} / \rho_a \text{ (二面摩擦)}$$

$$= 164.1 / 108$$

$$= 1.5 \text{ 本}$$

< 2 本

$$n_{2\text{req}} = P_{m2} / \rho_a \text{ (二面摩擦)}$$

$$= 62.5 / 108$$

$$= 0.6 \text{ 本}$$

< 1 本

せん断力

ボルト総数 $N = 3$ 本

$$\rho_s = S / N$$

$$= 140 / 3$$

$$= 46.7 \text{ kN}$$

$$< \rho_a \text{ (二面摩擦)} \cdots \text{OK}$$

合成ボルト力

$$\rho_{m1} = P_{m1} / n_1$$

$$= 164.1 / 2$$

$$= 82.1 \text{ kN}$$

$$\rho_{m2} = P_{m2} / n_2$$

$$= 62.5 / 1$$

$$= 62.5 \text{ kN}$$

$$\rho_1 = \sqrt{\{(\rho_{m1})^2 + (\rho_s)^2\}}$$

$$= \sqrt{\{82.1^2 + 46.7^2\}}$$

$$= 94.4 \text{ kN}$$

$$< \rho_a \text{ (二面摩擦)} \cdots \text{OK}$$

$$\rho_2 = \sqrt{\{(\rho_{m2})^2 + (\rho_s)^2\}}$$

$$= \sqrt{\{62.5^2 + 46.7^2\}}$$

$$= 78.0 \text{ kN}$$

$$< \rho_a \text{ (二面摩擦)} \cdots \text{OK}$$

添接板

デッキを含む主リブ断面中立軸位置に対する主リブ単体および添接板の断面二次モーメント

$$I_{\text{rib}} = 20500000 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{ribSPL}} = 28900000 \text{ mm}^4$$

添接板に作用する曲げモーメント

$$M_{\text{rib}} = I_{\text{rib}} \times \sigma / y_{1\text{rib}}$$

$$= 20500000 \times 153.8 / 147.4$$

$$= 21390000 \text{ N} \cdot \text{m}$$

添接板の縁端に生じる応力度

$$\sigma_{\text{SPL}} = M_{\text{rib}} / I_{\text{ribSPL}} \times y_{1\text{SPL}}$$

$$= 21390000 / 28900000 \times 142.4$$

$$= 105.4 \text{ N/mm}^2$$

$$< \sigma_{\text{aSPL}} \cdots \text{OK}$$

以上の設計結果より、橋軸直角方向接合線継手の構造を図 2-8 に示す。

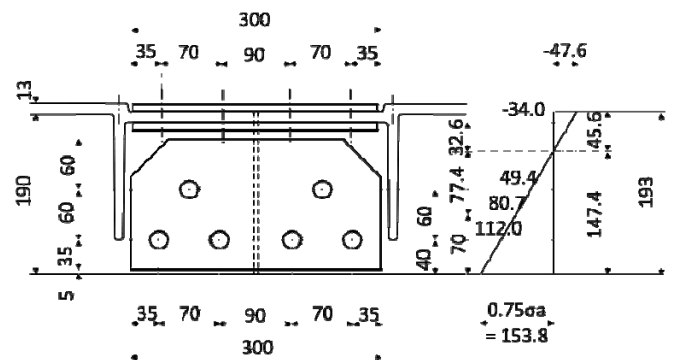


図 2-8 橋軸直角方向接合線継手図

d) 橋軸方向接合線継手の設計

橋軸方向接合線継手は、一面摩擦接合になる設計を行った。

作用せん断力 $S=140\text{kN}$

必要ボルト本数

$$\begin{aligned}n_{\text{req}} &= S / \rho_a \quad (\text{一面摩擦}) \\ &= 140 / 54 \\ &= 2.6 \text{ 本}\end{aligned}$$

配置本数（輪荷重の設置幅 500mm 以内）

$$n=4 \text{ 本以上} > n_{\text{req}}$$

以上の設計結果より、橋軸方向接合線継手の構造を図2-9に示す。

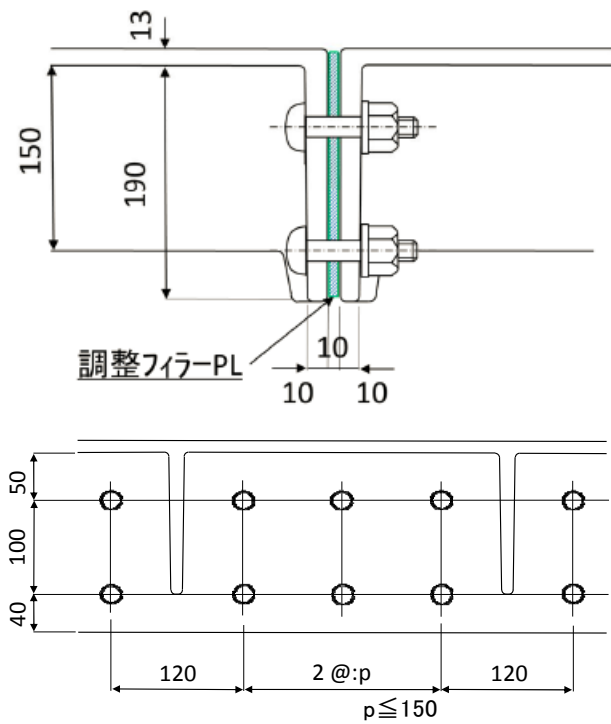


図 2-9 橋軸方向接合線継手図

第3章 鑄鉄床版の製造

3.1 製造検討フロー

鑄鉄床版は、薄肉リブ形状を有する大型鑄物であり、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鑄造方案（鑄造方法の設計）の策定が必須である。

本研究では、世界的に広く利用されているMAGMA社の鑄造シミュレーションソフト（MAGMA SOFT）を用いて、熱・流体・凝固解析を行い、製品部へ溶湯をスムーズに充填させ、健全鑄物とするための湯口、湯道、堰、押し湯の形状／配置の検討を行った。図3-1に鑄鉄床版の製造検討フローを示す。

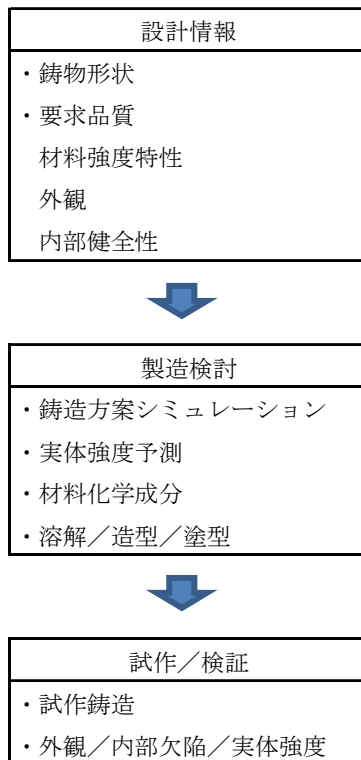


図3-1 鑄鉄床版 製造検討フロー

3.2 鑄造シミュレーションの予測精度向上

球状黒鉛鑄鉄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、鑄物の各部位の強度を予測するには、溶湯鑄込み後の冷却過程における鑄鉄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。MAGMA SOFT で標準的に設定されている鑄型物性値等を用いて、図3-2示す位置の鑄込み後の温度変化を求めるとともに、鑄造時に熱電対を挿入し、解析と同じ箇所の温度変化の測定を行った。

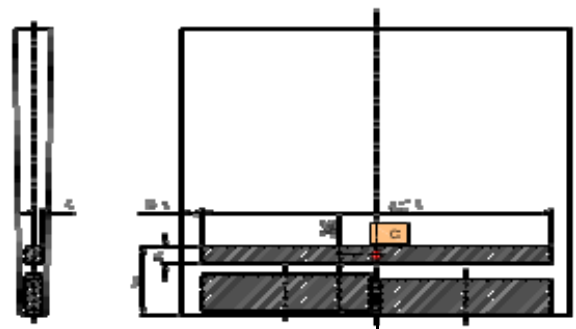


図 3-2 鑄鉄床版リブ部の温度測定位置

図 3-3 に解析と鋳造時の温度測定結果から導いた冷却曲線を示す。解析と測定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ることが分かった。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、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できるようになった。

解析結果の参考例として、図 3-4 に MAGMA SOFT で行った際に得られる湯流れ状態図を示す。時間経過とともに溶湯が充填されていくのが分かる。また、色は温度を示しており、流れ方や温度の状態を評価しながら方案の修正等を行うことができる。

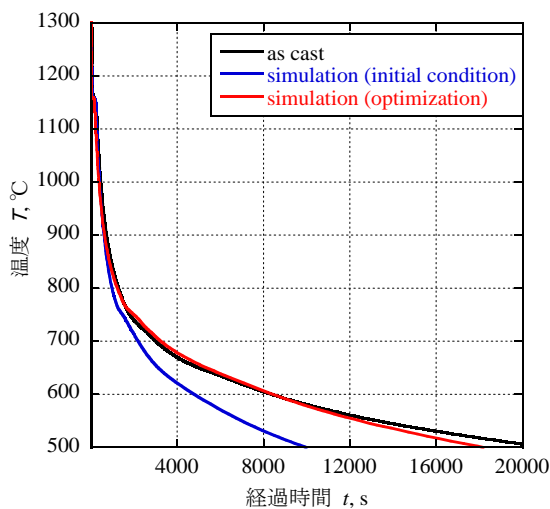


図3-3 解析および温度実測による冷却曲線

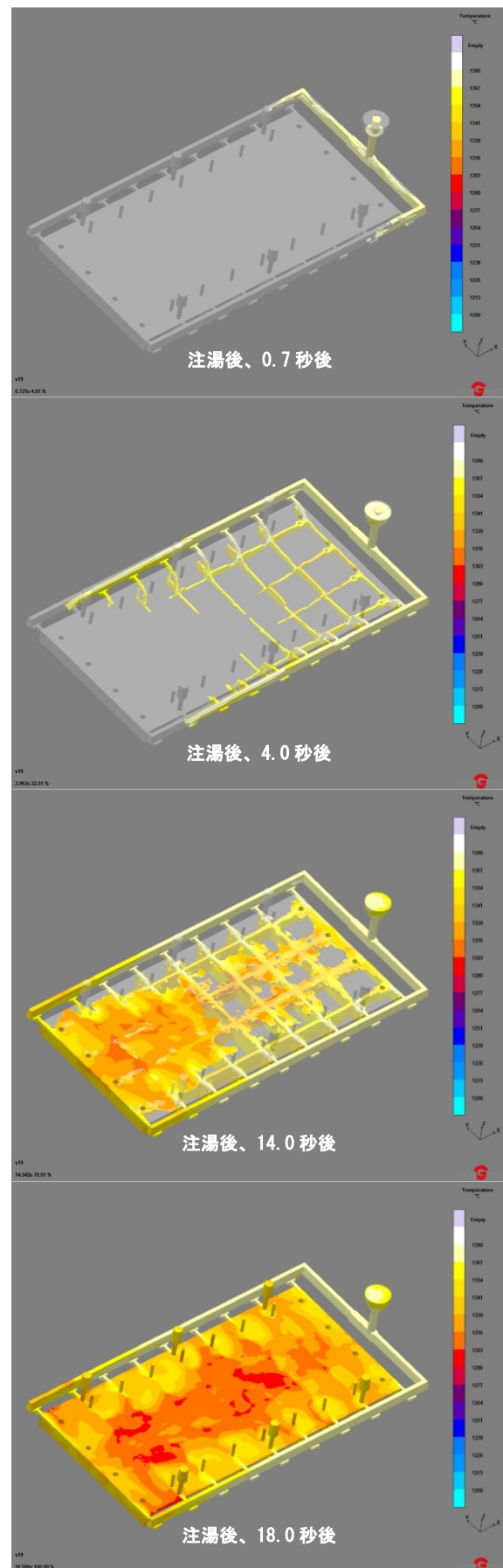


図3-4 MAGMA SOFTによる湯流れ解析例

3.3 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組織制御技術の確立に取り組んだ。

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。化学成分の中でも特にCuはパーライトの生成を促し、球状黒鉛鋳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、鋳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3-5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℃から700℃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3-6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、 $CR_{9/7}$ が増大するほどパーライト率が増加する。図3-6にMAGMA SOFT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3-7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。すなわち、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ことが分かった。

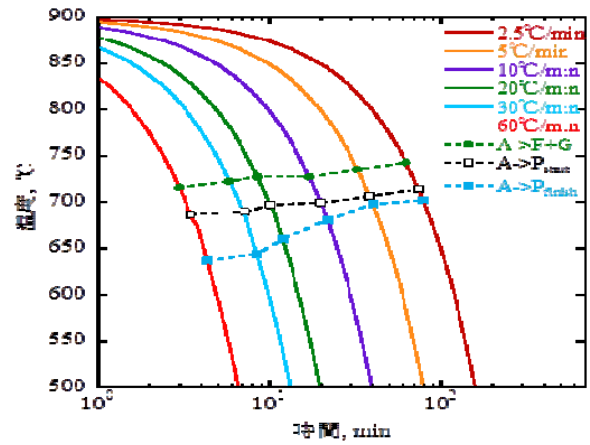


図3-5 鋳鉄床版実体のCCT曲線

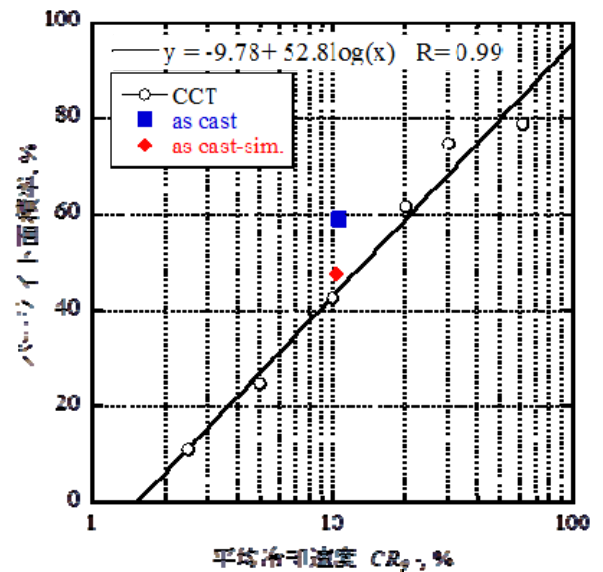


図3-6 平均冷却温度とパーライト面積率の関係

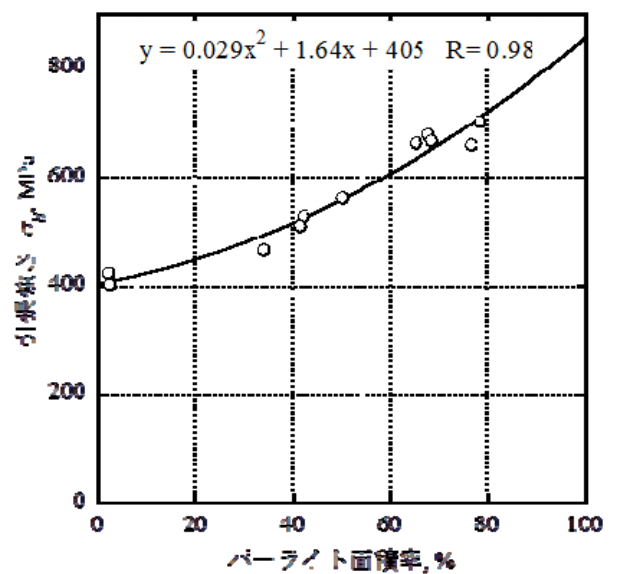


図3-7 パーライト面積率と引張強さの関係

第4章 鑄鉄床版材料（球状黒鉛鑄鉄）の特性

鑄鉄床版材として使用する球状黒鉛鑄鉄（ダクタイル鑄鉄，FCD，JIS G 5502）は，特段の後処理なしで鋼に近い強度を得ることができ，また片状黒鉛鑄鉄（普通鑄鉄，FC，JIS G 5501）と比べ優れた材料特性を有した材料であり，鑄物の特長である一体成形性と自由成形性を活かし，自動車の足周り部品や鉄道部品，水道管やマンホールといった様々な用途に使用されている．一方で，「鑄物は脆くて割れやすい」といったイメージがあるが，ここで対象となる鑄物は片状黒鉛鑄鉄であることが多い．

本章では，試作品として製造を行った実大サイズ（1245mm×2495mm）の鑄鉄床版のリブから切出した試験片を使い，鑄鉄床版材料の特性把握を行った．

4.1 機械特性

(1) 試験片採取

鑄鉄床版材料の機械特性（引張強さ，伸び，硬さ）を把握する際，製造時の冷却速度の違い（板厚差）による影響と荷重を支持するリブを評価することを目的に，鑄鉄床版のリブからの試験片採取，試験片採取位置はデッキプレート上面からリブ下面までが包含されるよう検討した．検討の結果，試作した鑄鉄床版のリブの切出し位置を図4-1に，切出したリブからの試験片採取位置を図4-2に，採取した試験片の加工図を図4-3に示す．

また，試作時の鑄鉄床版の化学成分とJIS G 5502（2001）「球状黒鉛鑄鉄品」の解説にある化学成分の参考値を表4-1に示す．⁷⁾

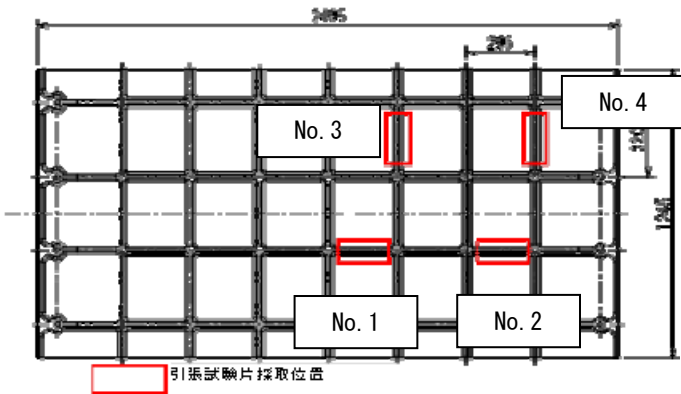


図 4-1 リブ切出し位置

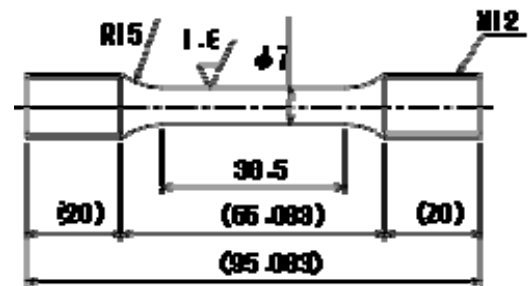


図 4-3 試験片加工図（JIS 14A 号試験片）

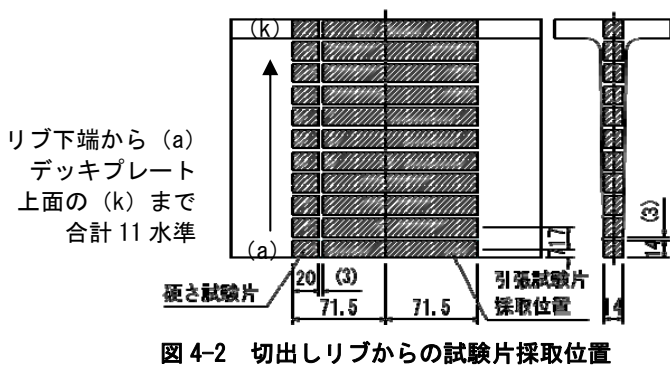


図 4-2 切出しリブからの試験片採取位置

表4-1 化学成分表 [%]

種類	C	Si	Mn	P	S
鑄鉄床版 試作品	3.6	2.2	0.3	0.03	0.01
JIS	FCD 500-7	2.5 以上	-	-	0.02 以下
	FCD 600-3	2.5 以上	-	-	0.02 以下

(2) 試験条件

引張試験は JIS Z 2241 (2011)「金属材料引張試験方法」にて、硬さ試験は JIS Z 2243 (2008)「ブリネル硬さ試験」に準じて実施した。^{8) 9)} その他の試験条件は以下の通り。

- ・島津製作所製 引張試験機
(ねじ式 AG-G (XR) 堅型 (250kN))
- ・引張試験速度 (クロスヘッド変位速度) :
0.5mm/min
- ・島津製作所製 ブリネル硬さ試験機
- ・硬さ試験圧子直径 : 10mm
- ・硬さ試験力 : 29.42kN

(3) 試験結果

試験結果を表 4-2 に示す。また、参考として、表 4-2 の最下段に JIS G 5502 (2001)「球状黒鉛鋳鉄品」に記載されている鋳鉄床版の材料に近い FCD600 材の機械的性質を示す。⁷⁾ 表 4-2 に示す標準偏差から、機械的性質の引張強さ、0.2%耐力、破断伸び、硬さの全てでばらつきが少ないことを確認した。また、破断伸びは、引張強さが近い JIS の FCD600-3 材で示されている 3%以上に対し、鋳鉄床版の材料では平均 11.6%と大きく上回っていることを確認した。⁷⁾ 一方、目標値としていた 0.2%耐力 350kN/mm² 以上、破断伸び 10%以上を若干下回る部分があったが、この点については、化学成分の見直しや鋳造方案の修正により、十分目標達成可能なレベルであると考えられる。^{10) 11) 12)}

引張試験結果からの鋳鉄床版材料の応力-ひずみ関係を図 4-4 に示す。

表 4-2 機械特性 試験結果

試験片 採取位置	引張強さ [N/mm ²]	0.2% 耐力 [N/mm ²]	破断 伸び [%]	硬さ [HBW]	
No. 1	(a)	586	340	13.5	197
	(b)	616	351	13.4	201
	(c)	615	350	11.3	198
	(d)	610	347	9.9	197
	(e)	605	344	10.7	204
	(f)	595	338	9.8	197
	(g)	587	332	10.8	189
	(h)	575	326	9.0	192
	(i)	581	324	9.9	195
	(j)	576	322	10.5	197
	(k)	571	317	11.7	187
No. 2	(a)	577	331	13.8	197
	(b)	608	348	12.4	207
No. 3	(a)	584	340	14.4	197
	(b)	612	352	12.2	197
No. 4	(a)	595	333	13.0	201
	(b)	619	342	12.4	207
平均	598	339	11.6	198	
標準偏差	15.5	10.6	1.6	5.8	
(参考) JIS FCD600-3	600 以上	370 以上	3 以上	170~ 270	

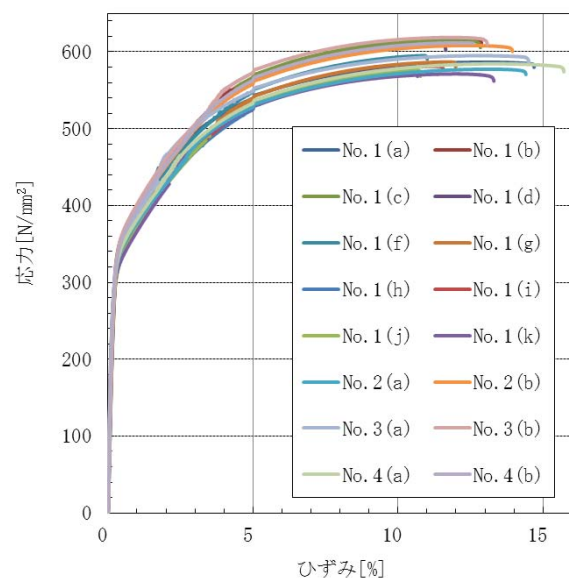


図 4-4 応力-ひずみ関係

4.2 鋳肌付き試験片の疲労特性

鋳鉄床版の特徴である機械加工を施さない表面の鋳肌は、既往の文献によると鋳肌無し（機械加工肌）に比べ疲労強度が2～3割程度低下することが確認されている。^{13) 14) 15)}

開発を進める鋳鉄床版において経済性も重要であり、機械加工は可能な限り適用しないことが必要である。従って、鋳鉄床版の疲労に関する照査は、この鋳肌を有した状態での疲労特性により実施する必要があることから、鋳肌有り、鋳肌無しの試験片を用いて、片振り3点曲げ疲労試験により、疲労強度の評価を実施した。

(1) 試験片採取

図4-5に示すよう、疲労試験用に鋳鉄床版試作品からプラズマ切断機を用いてリブを切出しし、切出したリブから図4-6に示すよう①が鋳肌付き、②が鋳肌無し（機械加工で鋳肌を除去）の試験片を採取した。採取した試験片は、図4-7に示すよう②の鋳肌無しの試験片のみ機械加工によりリブ下端部表面の鋳肌の除去を行った。

(2) 試験条件

疲労試験は、3点曲げ疲労試験にて実施した。試験条件は以下の通り。

- ・島津製作所製 電気油圧サーボ式試験機
(EHF-EV101K-040-1AS)
- ・応力比：0.1
- ・試験周波数：25Hz
- ・最大繰返し数：1000万回
- ・試験温度：24℃

(3) 試験結果

プロット点の回数を試験片が破断した時点とし、試験結果を図4-8に示す。鋳肌有りの疲労強度は、鋳肌無しと比べ2～3割程度低下しており、既往の文

献とも合致することが確認できた。また、鋳肌有りと鋳肌無しとの試験片の破断位置と破面の状態に大きな違いはなく、鋳肌有りで330N/mm²前後の疲労強度であった。^{13) 14) 15)}

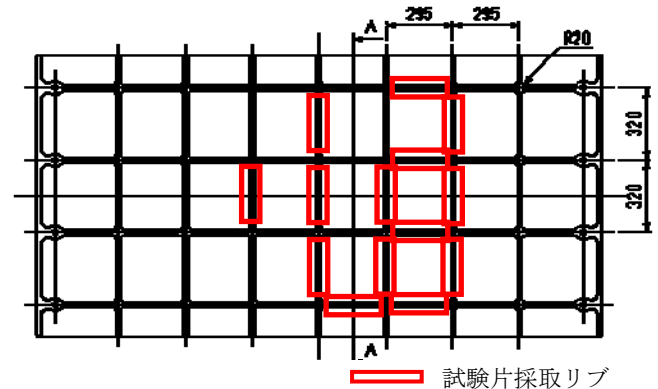


図4-5 リブ切出し位置

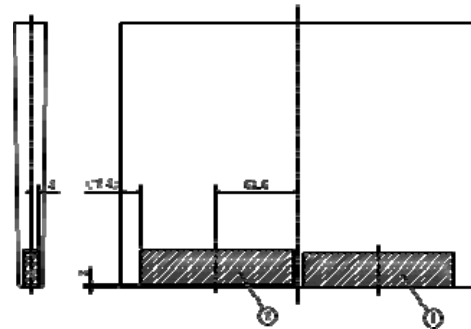


図4-6 リブからの試験片採取位置

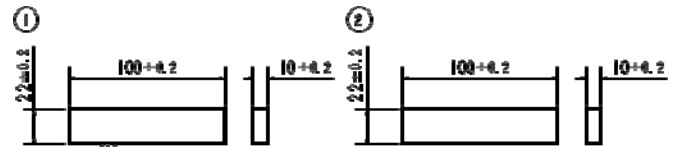


図4-7 試験片形状

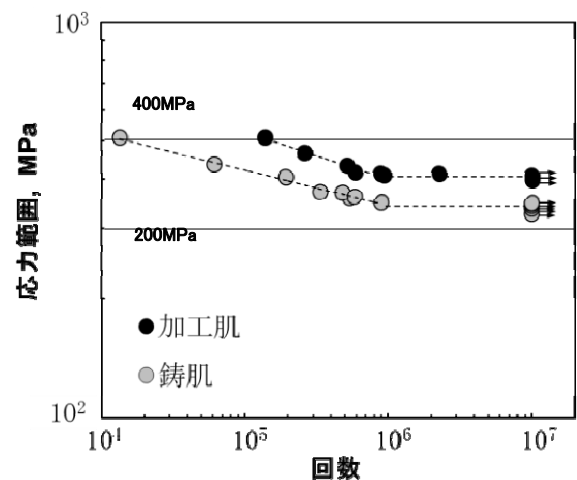


図4-8 鋳肌付き、鋳肌無し試験片S-N曲線

第5章 鋳鉄床板の力学特性

第4章で、試作した実大サイズの鋳鉄床板のリブから切出した試験片を使って、鋳鉄床板材料（球状黒鉛鋳鉄）の機械特性と表面に鋳物特有の鋳肌（最大高さ粗さRz100 μ m前後）を有した状態の疲労強度の把握を行った。

本章では、鋳鉄床板を道路橋床板として適用を図るため、鋳鉄床板を使い静的／動的な荷重に対する力学特性の把握を行った。

5.1 静的荷重試験

鋳鉄床板が十分に塑性変形するまでの静的荷重と荷重後の磁粉探傷検査によりき裂などの発生の有無確認を実施した。

(1) 試験体

試験体は、実大サイズで試作した鋳鉄床板（1245mm×2495mm）を使用し、図5-1に示す位置にひずみゲージと変位計を設置した。

(2) 試験条件

試験条件は以下の通り。

- ・島津製作所製 圧縮試験機

（UH-C2000kNA 形，最大荷重 2000kN）

試験にあたり、図5-2に示すH形鋼を用いた試験架台を製作し、図5-3に示すよう、この試験架台上に鋳鉄床板を設置した。荷重部は鋳鉄床板中央部とし、鋳鉄床板と試験機圧盤との間にゴム板（200mm×500mm×厚さ 10mm，繊維補強入り）、鋼製荷重板（200mm×500mm×厚さ 50mm），荷重架台を設置した。

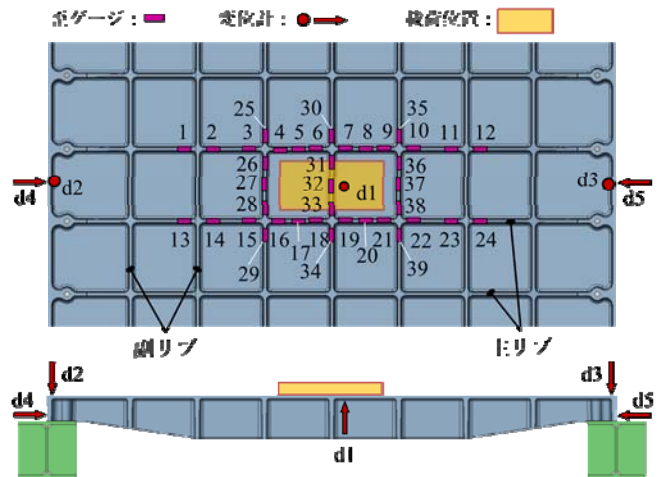


図5-1 ひずみゲージ，変位計設置位置



図5-2 試験架台

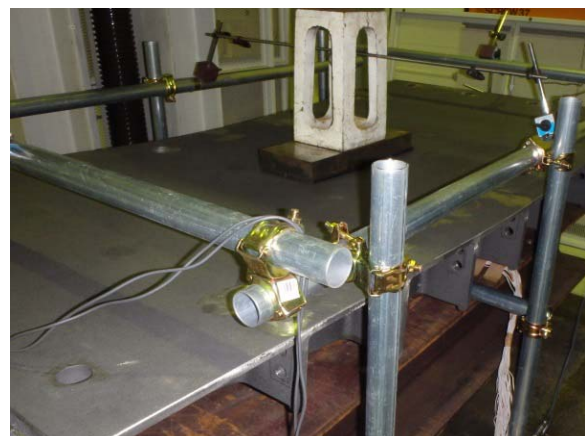


図5-3 試験状況

表 5-1 に試験荷重と試験速度を示す。試験速度は、マンホール鉄蓋の載荷試験条件を参考に、350kN/min の荷重制御で実施した。¹⁶⁾ また、0kN～300kN までの載荷試験では、途中のプロットデータを取るため 140kN, 200kN 時点で計測を行った。710kN を載荷した際の変位を確認し、載荷荷重 880kN と 941kN の載荷試験は急激な変形を伴うことを予測し、安全面から 6mm/min の変位制御とした。

載荷荷重に到達した後、荷重を1分間保持し、その後、ひずみとたわみの測定を行った。測定後は緩やかに荷重を除荷し、残留ひずみと残留たわみを測定した。たわみと残留たわみについては、中央部の変位d1から端部の鉛直方向変位d2, d3の平均値を減じて求めた。

(3) 試験結果

試験は、載荷中に異音（衝撃音）や振動などの異常発生は認められず、1000kN 弱までの載荷を行った。

図 5-4 に示す荷重と最大たわみの関係で、近似曲線は 0～200kN のデータ範囲を用い、傾きが変わる点は 287kN, 287kN まではたわみが直線的に増加し、それ以降は対数曲線的に変形することが確認できた。また、最大載荷荷重は 941kN で、たわみは 76.8mm であった。

図 5-5 に示す残留たわみから、300kN よりも小さい載荷荷重から残留たわみが発生することが推測でき、荷重-最大たわみ関係での直線から対数曲線の傾きが変わる点から塑性変形が始まったことが確認できた。試験後の残留たわみは 49.3mm であった。

表5-1 試験荷重と試験速度

試験荷重 [kN]		試験速度
初期荷重	載荷荷重	
0	50	荷重制御 350kN/min
0	100	
0	140	
140	200	
200	300	
0	400	
0	500	
0	570	
0	640	
0	710	
0	880	変位制御 6mm/min
0	941	

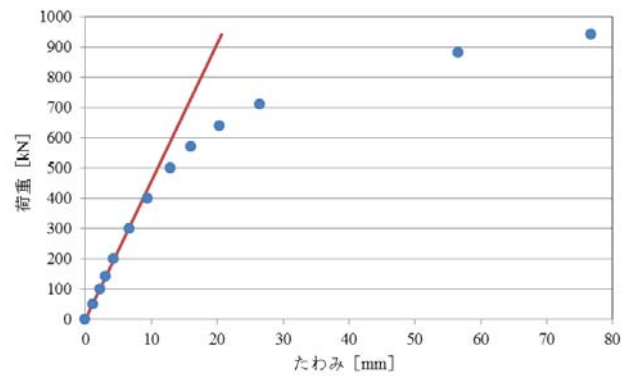


図5-4 荷重-最大たわみ関係

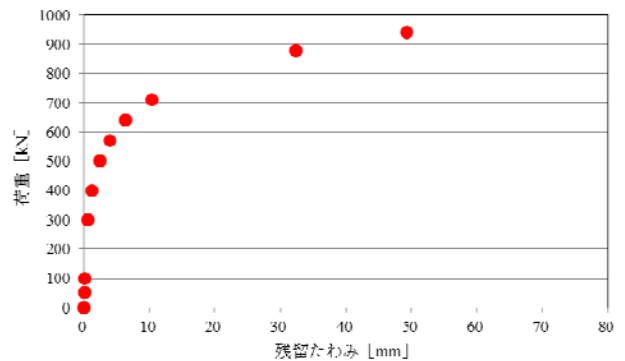


図5-5 残留たわみ

図5-6に橋軸直角方向に配した主リブ、図5-7に橋軸方向に配した副リブの荷重とひずみゲージの測定結果を示す。凡例のNo. は、図5-1のひずみゲージ貼り付け位置を示す。一部プロットが無い凡例があるが、ひずみゲージの断線によって計測不能となったものである。結果から、ひずみゲージの貼り付け箇所が中央荷重時に対称な位置関係にあるNo. 1, 12, 13, 24とNo. 4, 9, 16, 21さらにNo. 6, 7, 18, 19の主リブのひずみ、また、No. 25, 29, 35, 39とNo. 27, 37の副リブのひずみの値もほぼ同等の値で推移しており、対称性を確認でき、試験としての妥当性が確認できる。さらに主リブに発生したひずみは、荷重に対しては300kN過ぎたところから増大していることが確認できる。主リブに貼り付けたひずみゲージでは941kN荷重時に最大43476 $\mu\epsilon$ (No. 7)と大きなひずみが発生したのに対して、副リブに貼り付けたひずみゲージでは、880kN荷重時で最大2787 $\mu\epsilon$ (No. 32)と小さい値となっている。主リブと副リブのひずみの大小については、今回の試験が鋳鉄床版パネル1枚での試験であることが原因であり、十分な塑性変形性能を有しているといえる。また、固定用の高力ボルトの飛散等を懸念し、鋳鉄床版の破壊状態までの荷重できなかったが、鋳鉄床版パネルは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、リブの破断など致命的な状態としないことを確認できた。

試験後の磁粉探傷検査結果を図5-8に示す。リブ交差部付近を中心に検査を行い、き裂などの発生は見られず、健全な状態であった。一部青白く写る部分は、主にゲージ貼り付け用のエポキシパテの残りであり、き裂ではない。

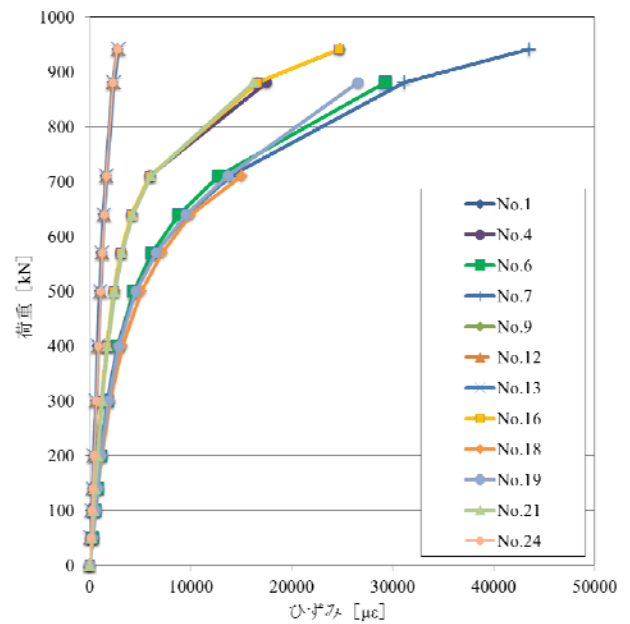


図5-6 主リブの荷重-ひずみ関係

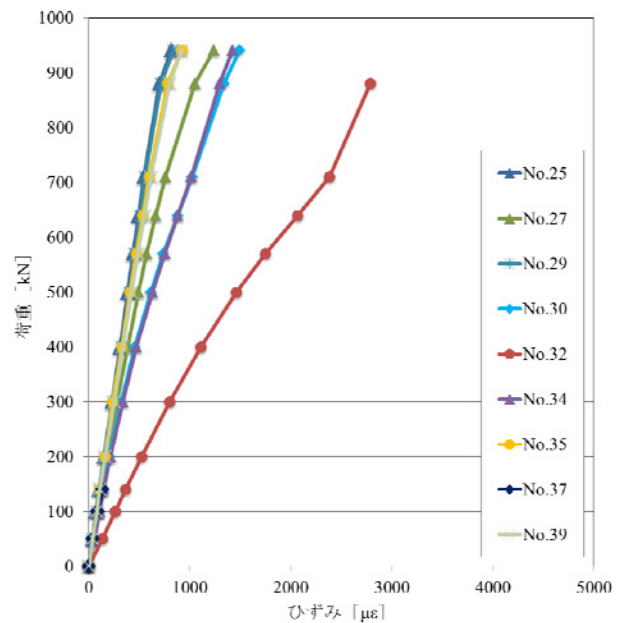


図5-7 副リブの荷重-ひずみ関係

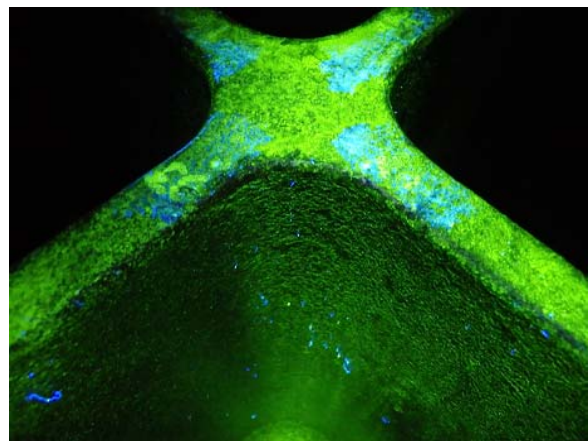


図5-8 磁粉探傷検査結果

5.2 定点繰返し载荷試験

鋳鉄床版に発生する最大応力が鋳鉄床版材料の許容応力と等しくなる試験荷重での定点繰返し载荷試験（1000万回）と、試験後の磁粉探傷検査でき裂などの発生の有無確認により、疲労耐久性能の評価を実施した。

(1) 試験体

試験体は、実大サイズで試作した鋳鉄床版（1245mm×2495mm）を使用し、ひずみゲージと変位計は図5-9に示すものと同じ位置に設置した。なお、ひずみゲージについては、载荷位置近傍となるNo. 4～No. 11, No. 18～No. 25, No. 36, No. 44～No. 46を評価対象とした。

(2) 試験条件

試験条件は以下の通り。

- ・島津製作所製 サーボパルサー試験機

（EHF-EV101K-040-1AS）

写真 5-10 に示すよう、試験用治具上に鋳鉄床版を設置し、中央 1 点载荷で試験を行った。载荷部には、試験機圧盤と鋳鉄床版との間に鋼製载荷板（200mm×500mm×厚さ 50mm）とゴム板（200mm×500mm×厚さ 10mm，繊維補強入り）を挿入した。

- ・载荷周波数：4Hz
- ・試験荷重：

a) 0 回～200 万回：14.5kN～159kN

静的载荷試験と FEM 解析結果から、試験体で発生する最大応力が鋳鉄床版材料の許容応力 205N/mm² となるよう設定。

b) 200 万回～400 万回：15.7kN～173kN

上記①の試験結果から、試験体で発生した最大応力が約 5%低かったことから試験荷重を再設定。

c) 400 万回～1000 万回：17.3kN～173kN

応力比が 0.1 になるよう再設定。

(3) 試験結果

a) 0 回～200 万回：14.5kN～159kN

図5-11に示す発生応力推移において、約35万回周期毎の変動挙動が確認された。この挙動は、試験時の载荷周波数4Hzから換算すると約24時毎に発生していることが分かり、また、変動ピーク時の時間帯が13～15時であることから、ひずみゲージが気温の影響を受けたためと想定された。

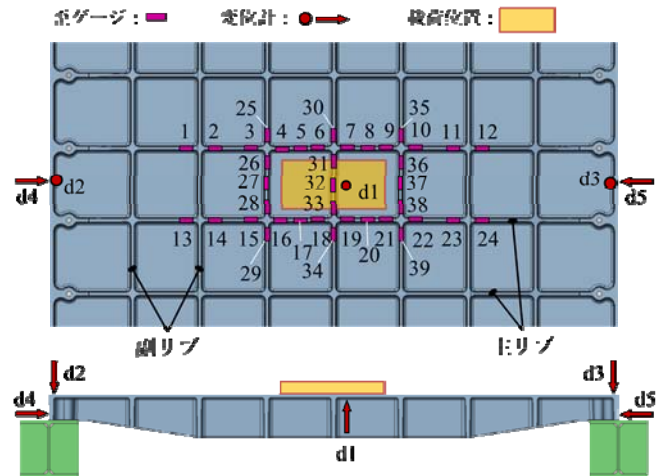


図5-9 ひずみゲージ、変位計設置位置



図5-10 定点繰返し载荷試験状況

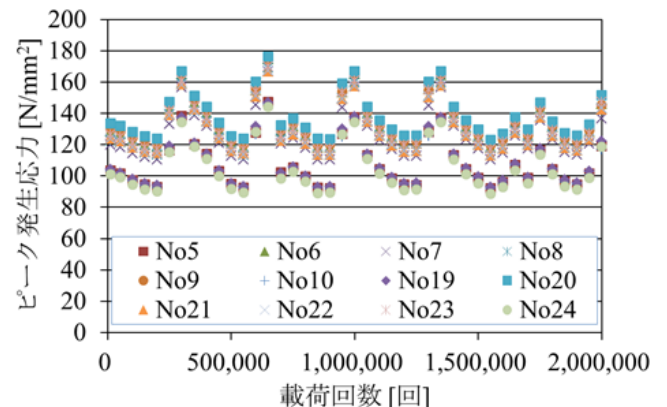


図 5-11 発生応力推移（0～200 万回）

前述の気温影響の想定に関し、図5-12に示す温度補正が可能であったたわみ推移ではこのような周期的な変動挙動はなく安定した状態であった。このことから、以降の試験では応力が変化しない箇所に温度補正用のゲージを設置し、発生応力推移のひずみ計測データから温度変化分の除外を行った。

b) 200 万回～400 万回 : 15. 7kN～173kN

温度変化分の除去により、図5-13に示すよう、発生応力推移は若干の変動はあるもの改善が図られ安定した。また、図5-14に示すよう、たわみ推移には大きな変化は見られず、安定した状態であった。

c) 400 万回～1000 万回 : 17. 3kN～173kN

発生応力推移を図 5-15 に、たわみ推移を図 5-16 に示す。発生応力、変位ともに 700 万回あたりの計測値に変動が見られる。これは試験再開時、誤って変形した載荷板を使用し、700 万回で載荷板を取替えており、700 万回以降の発生応力と 400 万回までの発生応力が同等レベルになっていることから、このことが原因と推定される。発生応力、変位とも変動はこの 1 回であり、それ以外では安定した状態であった。

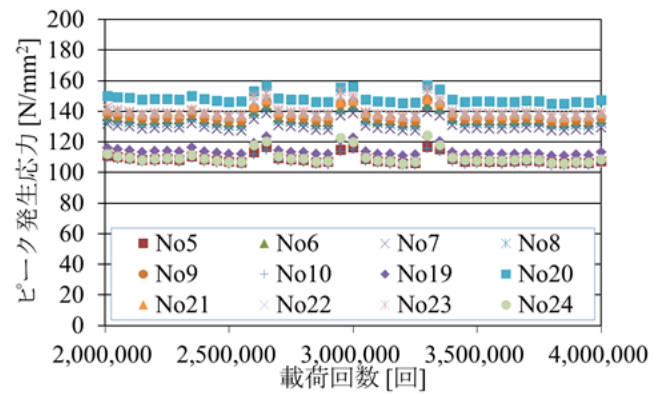


図 5-13 発生応力推移 (200 万回～400 万回)

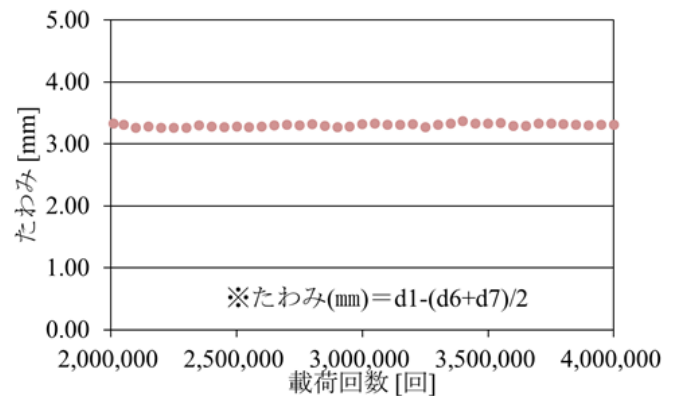


図5-14 たわみ推移 (200万回～400万回)

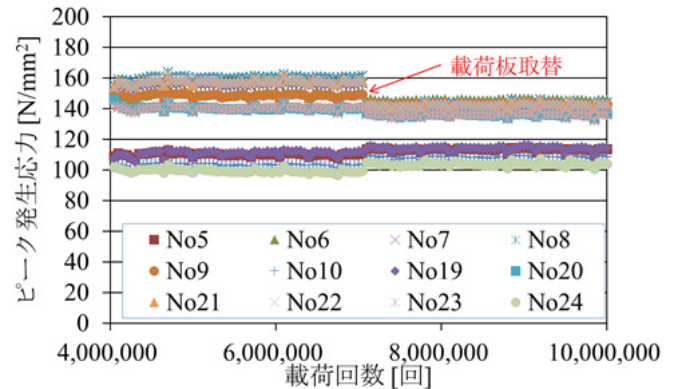


図 5-15 発生応力推移 (400 万回～1000 万回)

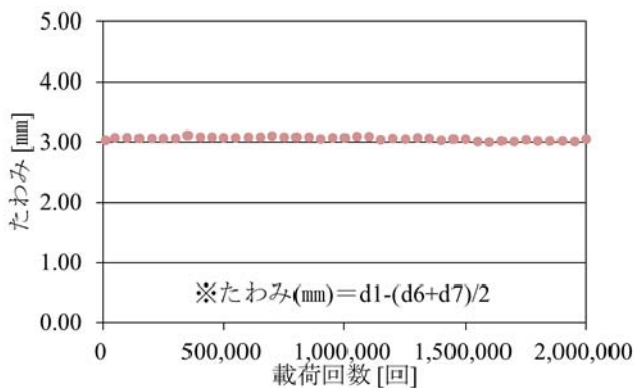


図 5-12 たわみ推移 (0～200 万回)

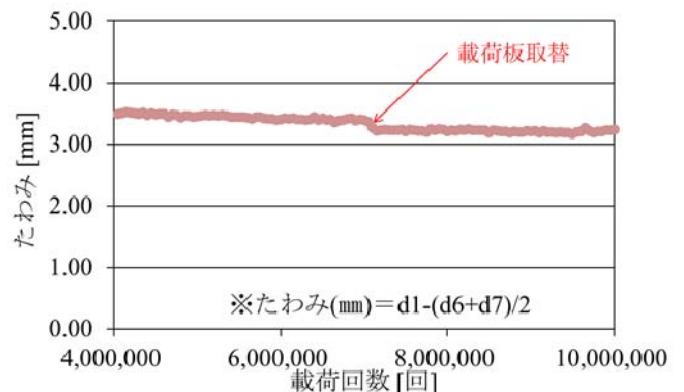


図5-16 変位推移 (400万回～1000万回)

定点繰返し1000万回载荷後の磁粉探傷検査結果を図5-17に示す。引張応力の大きいリブ下端部、リブ交差部に疲労き裂発生は見られず、健全な状態であることを確認した。一部青白く写る部分は、ゲージ貼付け用のエポキシパテの残りや清掃時に残った繊維クズであり、き裂ではない。

5.3 輪荷重走行試験

前節までに、静的／動的な荷重に対する鋳鉄床版単体での力学性能の確認を行い、発生応力やたわみ、試験後の試験体にき裂発生などの異常はなく、問題ないことを確認した。本節では、複数枚の鋳鉄床版を接合し、一定のサイズの連続体とした試験体を使った輪荷重走行試験と、試験後の磁粉探傷検査でのき裂などの発生の有無確認により、疲労耐久性能の評価を実施した。

(1) 試験体

試験に使用した2種類の実大サイズの鋳鉄床版の概略を図5-18に示す。鋳鉄床版の橋軸方向寸法は2種類とも1145mm、橋軸直角方向寸法は1290mmと1690mmであり、これら2種類の鋳鉄床版を合計12枚製作し、高力ボルトを使い摩擦接合し、図5-19、図5-20に示す橋軸方向4590mm、橋軸直角方向4690mmの一体化した試験体を作成した。

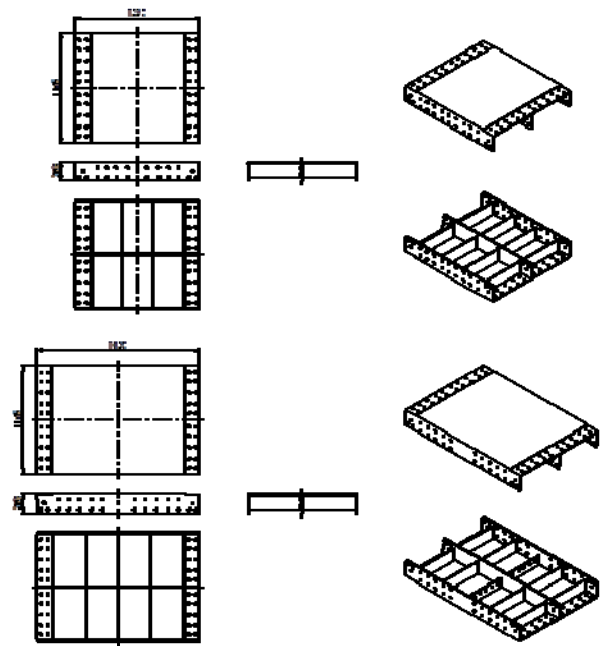


図5-18 鋳鉄床版概略図

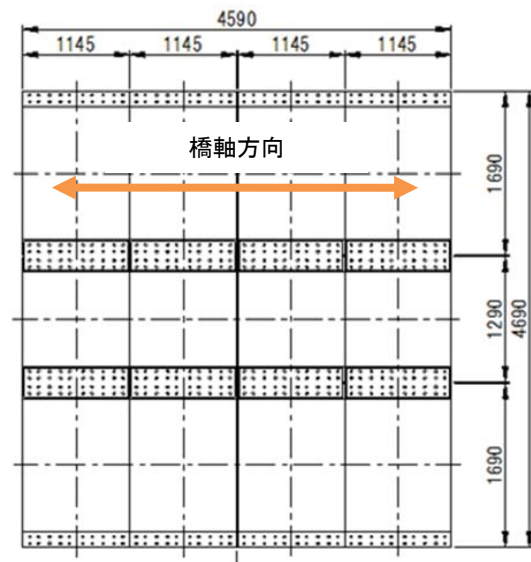


図5-19 輪荷重走行試験用試験体

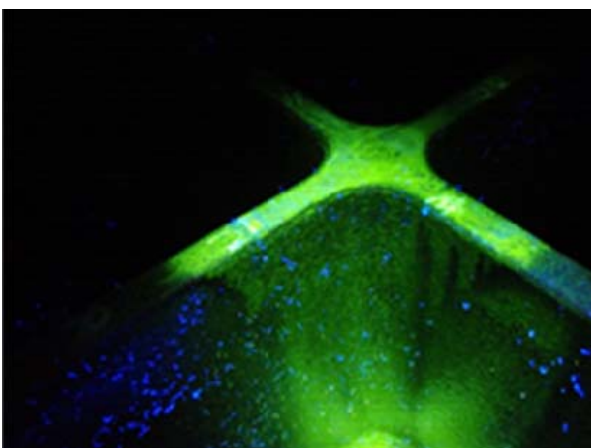


図5-17 磁粉探傷検査結果



図5-20 輪荷重走行試験用試験体（設置中）

(2) 試験条件

輪荷重走行試験機を図 5-21 に、試験機の仕様を表 5-2 に示す。

a) 試験体の設置

一体化した試験体の主桁間隔は、実橋を想定し 3000mm とした。輪荷重にて床版本体および接合部の疲労性能検証を目的とし、試験機架台との固定方法は片側を固定端、もう片側を可動端とし、図 5-220 に示すように、ストローク方向の両端部は床版の連続性を考慮し溝形鋼で補強した。

b) 載荷位置

図 5-23 に示す通り、載荷位置は主桁間隔の中心とし、試験機の仕様からストロークは 4600mm とした。

c) 載荷荷重

載荷荷重は、他の既設床版での試験条件などを勘案した中で、RC 床版における 400kN までの荷重漸増載荷を採用すると、鑄鉄床版の材料塑性域での促進実験となり、疲労耐久性の検証には至らないものと考えられる。今回の試験は鑄鉄床版として初めての輪荷重走行試験となることから、土木学会鋼構造委員会 道路橋床版 調査研究小委員会の検討を参考に 157kN (鉄輪) の一定載荷とし 100 万往復 (200 万回) とした。¹⁷⁾

d) 測定項目と測定方法

図 5-23 に示す、現場継手および工場継手の支間中央部を載荷荷重と同じ 157kN で静的載荷し、床版デッキ下面、リブ部のひずみ、床版のたわみ、接合部の離間を、輪荷重 20 万回毎に、測定した。

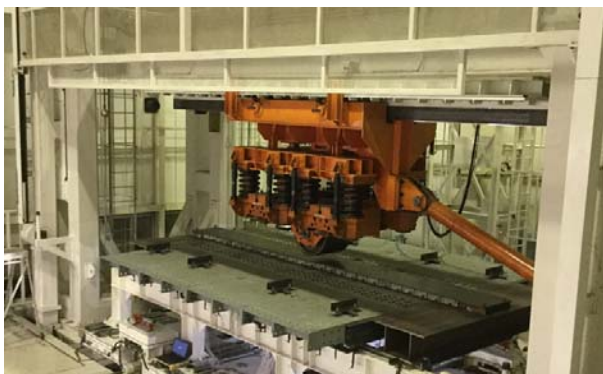


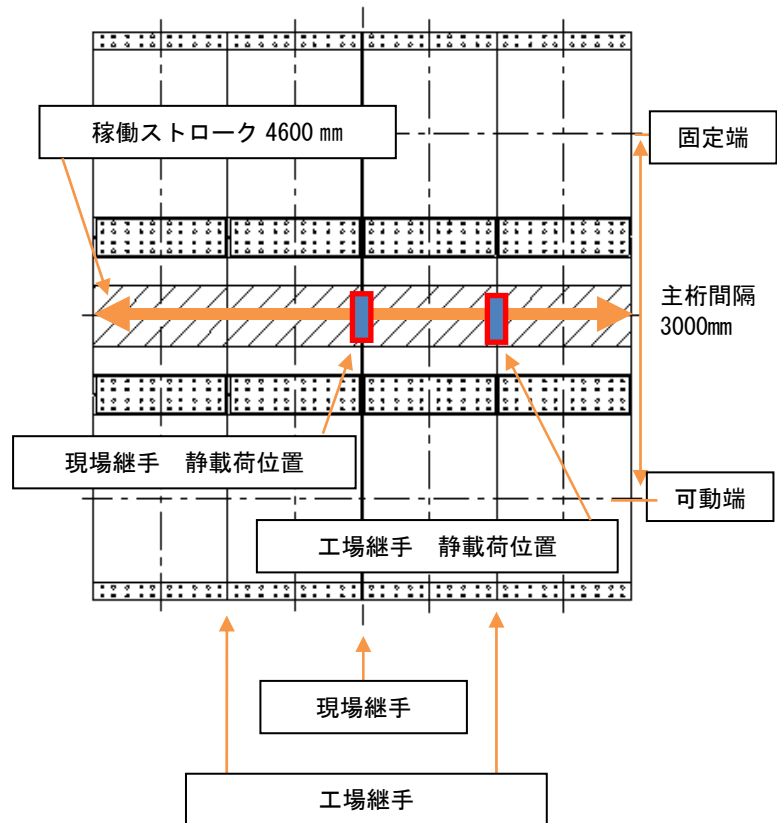
図 5-21 クランク式輪荷重走行試験機

表 5-2 試験機仕様

試験機寸法	フレーム : 高さ 6.5m × 幅 12m
	フライホイール直径 : 5.2m
車輪の種類	鉄輪 : 直径 700mm × 幅 500mm
試験機能力	走行ストローク : 4600mm
	フライホイール回転数 : 最大 900 往復/時
	載荷荷重 : 最大 400kN



図 5-22 鑄鉄床版端部の補強



載荷位置 : 斜線ハッチング部

稼働範囲 : 幅 500mm × ストローク 4600mm

図 5-23 輪荷重走行実験載荷位置

e) 載荷点の処置

載荷において、鉄輪が直接鋳鉄床版にふれると接触部となる鉄輪幅の線上での集中荷重となるため、表 5-3 に示す部材を鋳鉄床版デッキ上面に積み重ねた。各部材は、図 5-24 と図 5-25 に示すように、デッキ上面からゴム板、載荷板、載荷板カバー、ベニア板、鋼板を積み重ね、最上段の鋼板上を鉄輪が走行するようにし、鉄輪からの載荷荷重を 200mm×500mm の載荷板とその下面に敷いたゴム板を通じ鋳鉄床版のデッキ面上面に入力するようにした。また、図 5-26 と図 5-27 に測定機器の設置状態を示す。



図5-25 輪荷重載荷部位（設置完了）

表5-3 部材仕様

鋼板	板厚16mm	-
ベニア板	板厚5.5mm	-
載荷板カバー	板厚12mm	鋼製 載荷板上面に配置
載荷板	200mm×500mm 板厚55mm	鋼製 走行方向に26個配置
ゴム板	板厚8.1mm	ポリエステル帆布入り 耐摩耗ゴム



図5-26 デッキ下面の測定機器設置状態



図5-24 輪荷重載荷部位（設置途中）



図5-27 現場継手部の測定機器設置状態

(3) 試験結果

a) 発生応力

図5-28に現場継手部荷重時の荷重近傍のリブ下端部の発生応力の推移を示す。試験開始から試験完了時までの発生応力の変動幅は、鉄輪からの荷重という誤差要因にも係らず、各測定点とも $10\text{N}/\text{mm}^2$ 程度に収まっており、安定した状態であった。また、発生応力の最大値は $140\text{N}/\text{mm}^2$ を下回っており、鋳鉄床版材料の許容応力度 $205\text{N}/\text{mm}^2$ 以下であった。

b) たわみ

図5-29に現場継手部荷重時の継手支間中央部のたわみの推移を示す。試験開始から試験完了まで、たわみに大きな変動はなく安定した状態であった。また、たわみの最大値は 3mm 程度であり、これは支間距離 $L=3000\text{mm}$ に対し $1/1000$ 程度のたわみに留まるものであった。

c) 接合部の離間

図5-30に橋軸方向および橋軸直角方向の接合部の離間推移を示す。離間の変動幅は、橋軸方向、橋軸直角方向とも 0.01mm を下回っており、問題ないものと考えられる。

d) 磁粉探傷検査

荷重位置近傍の床版下面に対する磁粉探傷検査結果を図5-31と図5-32に示す。リブ下端部、リブ交差部いずれの箇所も疲労き裂の発生は見られず、健全な状態であった。

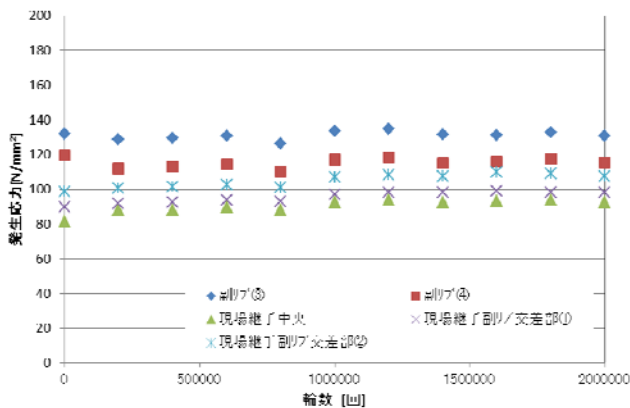


図5-28 発生応力推移

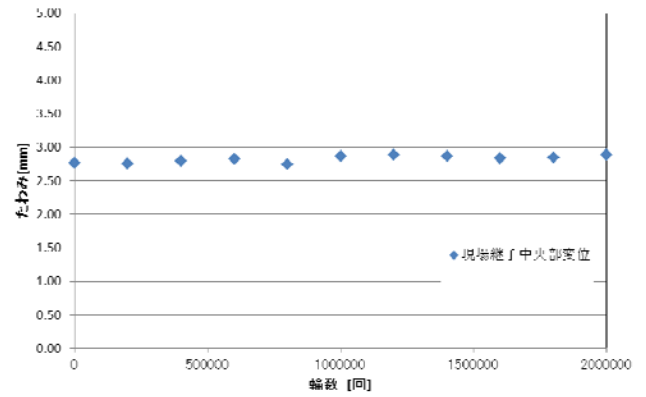


図5-29 たわみ推移

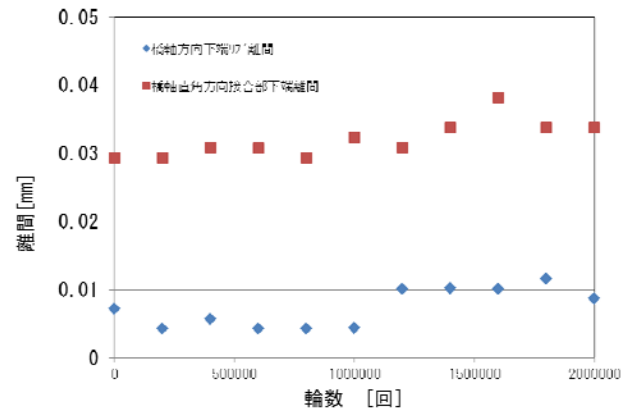


図5-30 接合部の離間推移

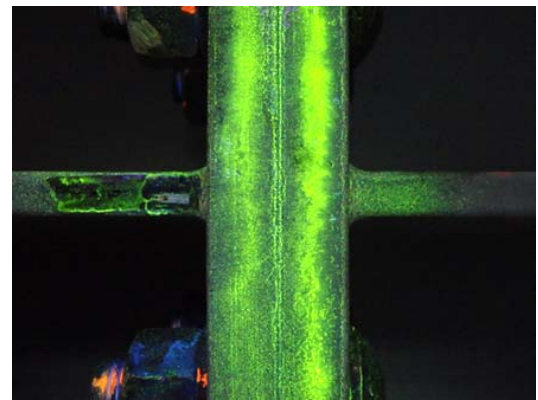


図5-31 磁粉探傷検査結果 (リブ下端部)



図5-32 磁粉探傷検査結果 (リブ交差部)

5.4 落錘衝撃試験

本節では、鋳鉄床版の衝撃性能把握のため、鋳鉄床版のデッキプレート上面に錘を自由落下させ破壊モードを確認する落錘衝撃試験を行った。

(1) 試験体

図5-33に示すとおり、鋳鉄床版実体から井桁状にリブに囲まれた部位（600mm×600mm）を切出して試験体を作成した。

(2) 試験条件

写真5-34に示すとおり、鋼製の錘200kgを2mの高さから試験体に接触する側をR10mmの球状にした鋼製のピンに自由落下させ、落下エネルギーを集中荷重にて供試体に伝え鋳鉄の破壊モードが捉えられるようにした。本試験の落下エネルギーは3,923Jであり、これは標準的な10tトラックの荷台高さ1,480mmから400mm×400mmの長さ1.6mのH型鋼を落下させたエネルギーに相当する。

図5-35に落錘衝撃試験の全景を示す

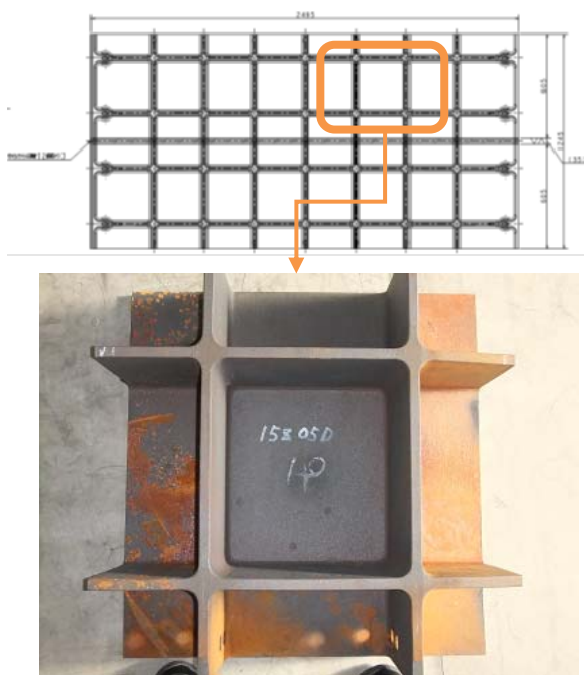


図5-33 落錘衝撃試験用試験体

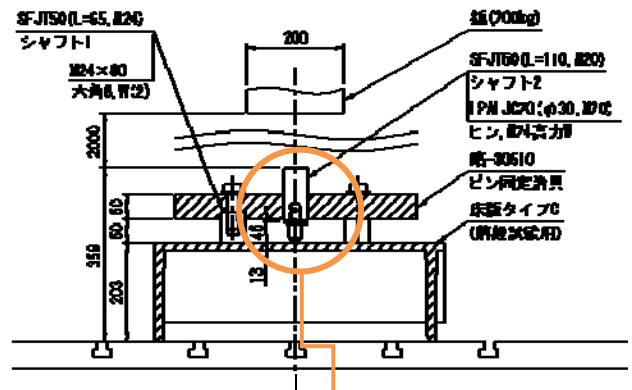


図5-34 試験治具

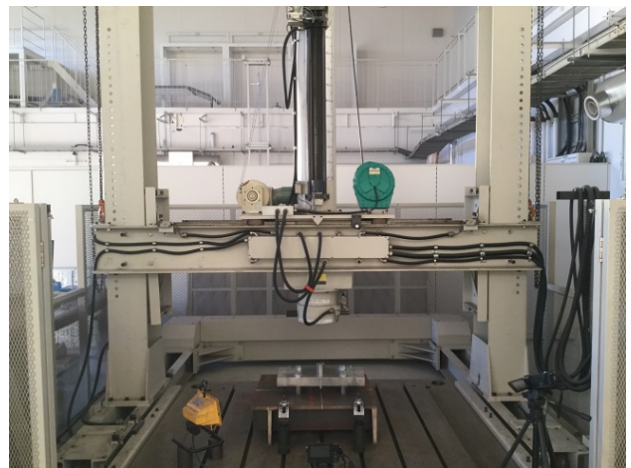


図5-35 落錘衝撃試験の全景

(3) 試験結果

図 5-36 に示すとおり，落下エネルギーの接触側となるデッキ上面は球状のピン先端部が食い込み，接触面周辺のデッキ部を鉛直方向下向きに巻き込む形ですり鉢状に変形したもののき裂などは確認されなかった．一方，図 5-37 に示すとおり，デッキ下面側は曲げによる引張により落錘時の接触点を中心に $\Phi 30\text{mm}$ 前後の範囲で十字状の割れが発生したものの貫通には至っていない状況であった．

今回の試験結果から，本落錘条件下での铸铁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デッキ面全体にき裂進展し破断に至るようなものではなく，集中した範囲内でのき裂発生と破壊に留まることが分かった．

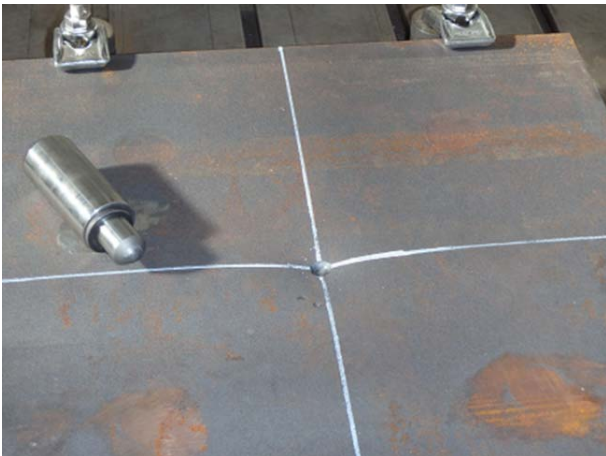


図5-36 試験後のデッキ上面



図5-37 試験後のデッキ下面

第6章 鋳鉄床版の施工性，維持管理性と適用範囲

鋳鉄床版の施工面，維持管理面において，鋳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。

6.1 施工性

鋳鉄床版の最大製造可能寸法は，経済性の観点からはより大きくしたほうがメリットが得られそうな反面，製造設備の大型化や専門性，特殊性といったデメリットが考えられる。

実橋適用を考慮した中で，本研究では1枚あたりの鋳鉄床版のサイズについて，トラック輸送時の積載効率の観点から橋軸方向長さを1145mm，橋軸直角方向長さは，既存設備で製造可能な2000mm以下に設定。¹⁸⁾ この1145mm×2000mm以下の小パネル化した鋳鉄床版を，工場にて図6-1に示すような施工現場までトラック輸送可能な2300mm×8000mm程度の架設ブロックに組立を行う。施工現場に輸送した架設ブロックは，高力ボルトを使った急速施工により，架設ブロック同士，架設ブロックと主桁とを接合し一体化させ，道路橋床版としていく。

道路橋示方書の施工の章を参考に，鋳鉄床版に特有となる点を以下に示す。

(1) 一般

a) 施工要領書

施工要領書には，以下に示す項目について，設計上の要求性能を確保することができる施工が行われることを示す要領を記載する。

- 1) 品質管理計画書
- 2) 材料および部品
- 3) 鋳造，加工
- 4) 工場地組立
(架設ブロック)
- 5) 工場塗装
- 6) 輸送
- 7) 架設
- 8) 高力ボルト締付け
(架設ブロック連結、主桁連結)
- 9) 現場塗装
- 10) 出来形検査

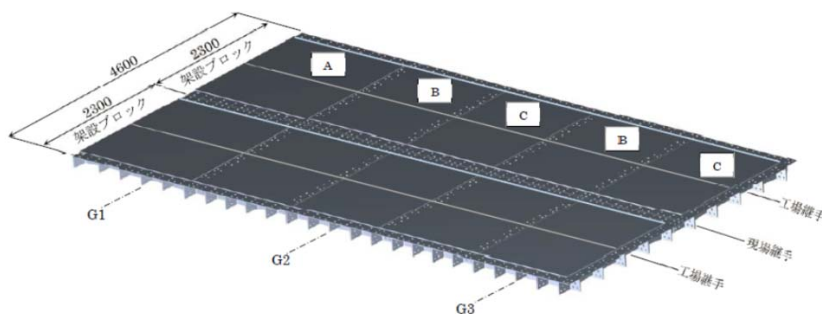


図6-1 鋳鉄床版 架設ブロックイメージ

b) 検査

鋳鉄床版の製造フローと検査例を図 6-2 に示す。

ここで特有となる検査要領は以下の通り。

成分分析：

JIS G 5502 (2001) 「球状黒鉛鋳鉄品」

第 5 項「化学成分」による⁷⁾

黒鉛球状化判定：

JIS G 5502 (2001) 「球状黒鉛鋳鉄品」

第 7 項「黒鉛球状化率」による⁷⁾

機械的性質：

JIS G 5502 (2001) 「球状黒鉛鋳鉄品」

第 6 項「機械的性質」による⁷⁾

鋳鉄床版の組立／施工フローと検査例を図 6-3

に示す。

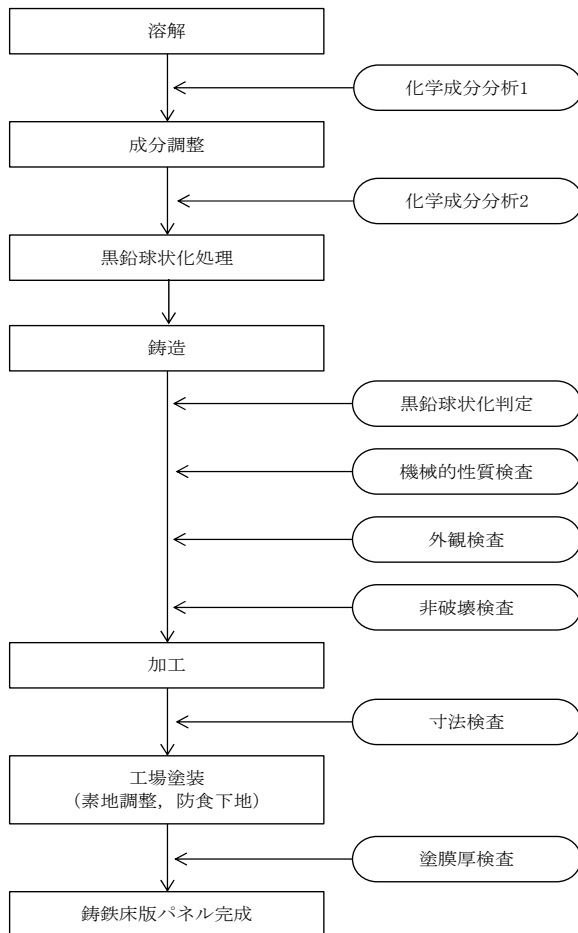


図6-2 製造フローと検査例

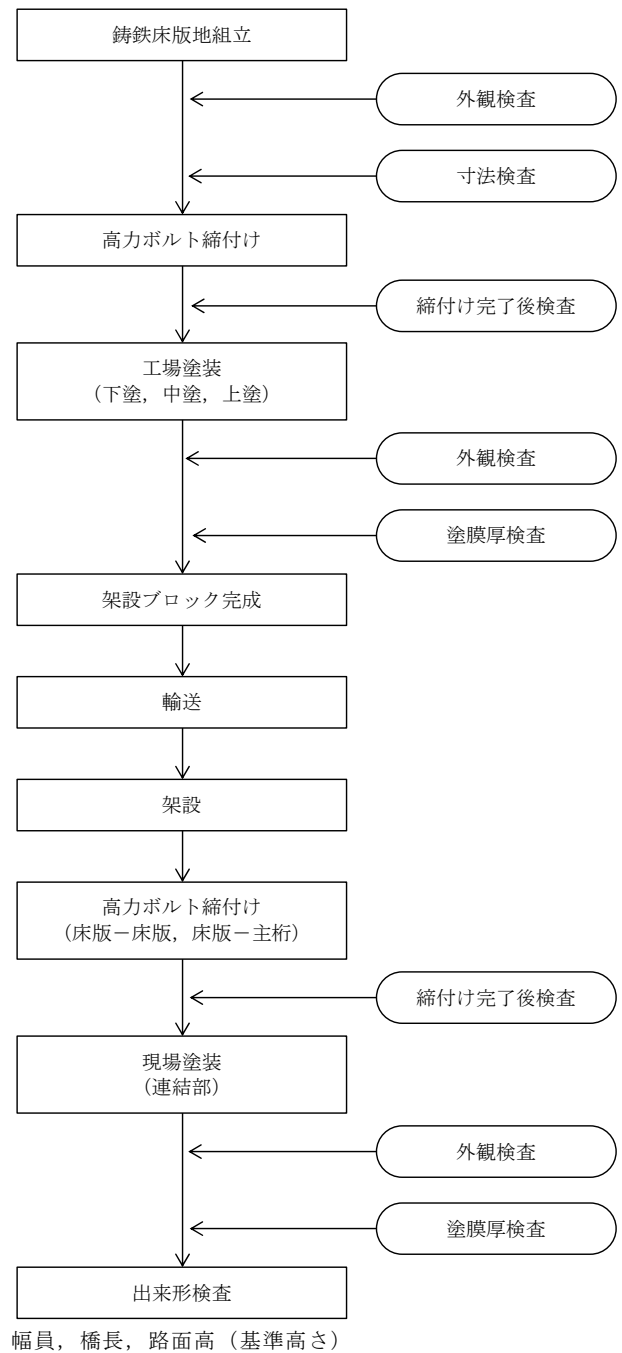


図6-3 組立／施工フローと検査例

(2) 鋳造

a) 材料検査時の供試体

鋳造した鋳鉄床版は、設計図などに記載された材料規格に合格していることが確認されなければならない。材料検査に使用する供試体は、JIS G 5502 (2001)「球状黒鉛鋳鉄品」では以下の2種類が規定されている。⁷⁾

・別鋳込み供試体：

鋳鉄品とは別に、砂型を用いて1バッチ毎に鋳造する供試体

・本体付き供試体：

鋳鉄品本体の所定の位置に、鋳鉄品と同種の鋳型を付着させ鋳造する供試体

鋳鉄床版の材料検査時の供試体は、別鋳込み供試体を採用することとし、事前に本体から切出した供試体との強度特性の相関を取得しておかなければならない。

b) 厚さ許容差

道路橋示方書では、鋼板の厚さについて、JIS G 3193 (2008)「熱間圧延鋼板および鋼帯の形状、寸法、質量およびその許容差」表5厚さの許容差を適用し、かつ備考により(-)側の許容差が公称板厚の5%以内にならなければならないと規定。^{6) 19)} 鋳鉄床版が用いる製造の鋳造では、圧延工程はなく圧延鋼板のような精度確保は困難であることから、耐荷性能に影響する(-)側の許容差のみを適用し、鋳鉄床版の各部位の厚さは、(-)側の許容差が設計板厚の5%以内にならなければならない。

c) 表面欠陥の補修

鋳鉄床版の表面には、有害な傷があってはならない。目視確認を行い、軽微なくぼみなどは、部位に応じてグラインダーなどで滑らかに補修する。また、砂型の割れや中子を用いて成形した部位に発生する凸状の変状は、グラインダーなどで補修しなければならない。なお、中子とは中に空洞がある形状の鋳物を作る際、空洞にあたる部分として鋳型の中にはめ込む砂型である。

(3) 加工

a) 切削加工

切削面の品質は、道路橋示方書Ⅱ編表-20.7.1に従い、最大高さ粗さRz50 μ m以下とする。⁶⁾

b) ボルト孔

表6-1に摩擦接合用のボルト孔径を示す。ボルト孔径の許容差は、 $-0+0.5\text{mm}$ とする。ただし、1ボルト群の20%に対しては、 $+1\text{mm}$ まで認めるものとする。

孔あけは、中子もしくは鋳型で成形する鋳抜き孔、または鋳造後に後孔でNC機械加工とする。孔あけによって孔の周辺に生じたまくれは削り取らなければならない。

架設ブロック間の相互の取り合いなどを確認する際、貫通ゲージの貫通率および停止ゲージの停止率は、それぞれ表6-2と表6-3に示す値をみたまなければならない。

表6-1 ボルト孔径

ボルトの呼び	ボルト孔径	
	標準孔	拡大孔
M22	24.5	26.5

表6-2 ボルト孔の貫通率

ねじの呼び	ボルト孔径	貫通ゲージの径(mm)	貫通率(%)
M22	標準孔	23.0	100
	拡大孔	23.0	100

表6-3 ボルト孔の停止率

ねじの呼び	ボルト孔径	停止ゲージの径(mm)	停止率(%)
M22	標準孔	25.0	80
	拡大孔	27.0	80

(4) 高力ボルトによる摩擦接合

a) 接合面の処理

鋳鉄床版の高力ボルト摩擦接合面は、過年度の研究成果より、すべり係数確保のため、表 6-4 に示す無機ジンクリッチペイントを塗装する。⁶⁾

(5) 防せい防食（塗装）

鋳鉄床版の防せい防食は塗装を基本とし、その施工にあたっては道路橋示方書の防せい防食によるものとする。¹⁸⁾ 塗装仕様や塗装にあたっての留意事項などは、鋼道路橋防食便覧の C-5 塗装系とする。²⁰⁾

(6) 施工期間

巻末に添付した既設 RC 床版橋からの床版更新を行う際の設計例から、床版取替工事における RC 床版、鋳鉄床版の比較設計結果の概要を以下に示す。

- ・ RC 床版と比較し、重量が 2.45kN/m^2 と軽い鋳鉄床版の特徴から、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、鋳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% と低減し、下部構造の耐震性が向上
- ・ 死荷重合計反力は、鋳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

鋳鉄床版への更新のメリットは、既設橋の補強無しで耐震性を確保できることが下部工設計反力の試算結果から明らかになっている。この既設橋への追加補強が無いことが大きく影響し、また高力ボルト接合による急速施工が可能なことから、施工期間の試算の結果、RC 床版への更新での全体工期が縦桁補強無しで 63 日、縦桁補強有りで 68 日要するのに対し、鋳鉄床版への更新では同 50 日と短く、また規

制期間も鋳鉄床版のほうが短くなることが分かった。全体工期および規制期間が短いことは、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できるものと考ええる。

6.2 維持管理性

鋳鉄床版の維持管理性において他の既存床版と比べ特長的な点は、 $1145\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 以内の鋳鉄床版を高力ボルト接合にて一体化させていることから、高力ボルトを取り外すことで部分的な床版取替が可能であることにある。積荷落下により床版デッキ面が損傷を受けた場合などに対する応急的な補修は、鋳鉄は溶接が困難な材料であるため、溶接補修を避け、ボルト取りであて板補修などになるが、鋼床版での既存工法と何ら違いはない。応急補修の手順としては、鋼床版デッキ面の貫通き裂の補修を参考に、以下のようなあて板補修を行う。

- ・ 損傷部周辺の舗装除去
- ・ 超音波探傷などにより損傷範囲を確認
- ・ 接合面の素地調整、接着剤塗布
- ・ 支圧接合用高力ボルトであて板補強

表 6-4 無機ジンクリッチペイント塗装条件

項目	塗装条件
接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚	$50\mu\text{m}$
接触面の合計乾燥塗膜厚	$100\sim 200\mu\text{m}$
乾燥塗膜中の亜鉛含有量	80%以上
亜鉛末の粒径 (50%平均粒径)	$10\mu\text{m}$ 程度以上

図 6-4 に積荷落下などの事故発生から供用再開までのフローを示す。

塗装のメンテナンスも、同一の塗装系であれば、鋼床版で使われている塗り替え方法、塗り替えサイクルなどに違いはないものとする。

ここで、床版更新後の 100 年間に掛かる RC 床版、鋳鉄床版の維持管理費について、それぞれの床版で特有となる維持項目を抽出し、日本橋梁建設協会がまとめた推定耐久年数（RC 床版の推定耐久年数は 100 年で設定）と国土交通省土木工事積算基準を元に試算した結果を表 6-5 に示す。^{21) 22)} なお、鋳鉄床版の舗装は鋼床版と同じグースアスファルト舗装とする。結論として、鋳鉄床版は塗替塗装が必要なことで RC 床版に劣る結果となった。しかしながら、鋼橋の防食工法として桁下空間を耐候性の高い外装材で覆うことで、塗替塗装なし、耐久年数 100 年といった新たな防食工法も存在し、今後の防食技術の発展によりこの差は縮まってくるものとする。²³⁾

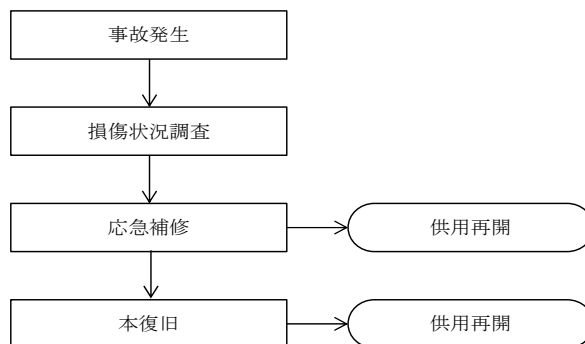


図 6-4 事故発生から供用再開までのフロー

表 6-5 維持管理費の比較

床版更新後 100年間の 維持管理費		RC床版					
		推定 耐久 年数	発生 頻度 (回)	橋面積 m^2 当たり費用			指標
				(千円/回)	累計 (千円)		
舗装	表層	10年	9	2.4	21.6	49.2	1.0
	基層	20年	4	2.5	9.9		
防水層	シート	20年	4	4.4	17.7		
	塗装	-	-	-	0.0		
床版更新後 100年間の 維持管理費		鋳鉄床版					
		推定 耐久 年数	発生 頻度 (回)	橋面積 m^2 当たり費用			指標
				(千円/回)	累計 (千円)		
舗装	表層	15年	6	2.4	14.4	136.8	2.8
	基層	30年	3	7.8	23.5		
防水層	シート	-	-	-	0.0		
	塗装	30年	3	33.0	99.0		

6.3 適用範囲

RC床版からの更新を想定した場合の、鑄鉄床版の適用範囲を表6-6に示す。

表 6-6 鑄鉄床版の適用範囲

		適用可否	備 考	
道路線形	平面線形	直 線	○	桁端部のブロック割調整区間であり桁端部補強は鋼製
		曲 線	△	曲率半径によっては、デッドリジョンを設けることで対応可能
		緩和曲線(クォット)	△	〃
		拡 幅	×	
	縦断線形	一定勾配	○	
		勾配変化	○	舗装厚(レバリング層)で調整
横断線形	一定勾配	○		
	勾配変化	○	舗装厚(レバリング層)で調整	
橋梁形式	I桁橋	単純桁	○	
		連続桁	○	
	箱桁橋	単純桁	×	箱桁上が密閉な構造となり、施工と維持管理が困難
		連続桁	×	
	トラス橋	上路橋	×	上弦材との連結が困難
		下路橋	○	床版支持が縦桁
	アーチ系橋梁	上路橋	△	補剛桁がI桁の場合のみ対応可能
		中路橋	○	床版支持が縦桁
下路橋		○	〃	
主桁の配置	直線橋	平行な直線桁	○	
		バチ桁	×	主桁間隔が変化する配置は困難
	曲線橋	単曲線桁	×	扇型のパネルとすることで可能であるが、タイプが増えコストアップ
		緩和曲線(クォット)	×	
	斜 橋	斜角無し(90°)	○	
斜角有り		○	床版パネルは矩形とし、斜角の端部に鋼製のパネルを用いることで対応可能	
架橋条件	環境条件	沿岸部	○	十分な防せい防食対策
		工業地帯	○	〃
		田園地域	○	
	気象条件	寒冷な地域	△	鋼床版と同様の路面凍結リスク
		普通の地域	○	
	施工条件	都市内の橋梁	○	クレーンによる架設が可能であること
郊外の橋梁		○	〃	
その他	維持管理性	点検性	○	
		損傷時の取替	○	ボルト接合であり、撤去・再設置が可能
		再塗装	○	
	道路幅員の改良	車道幅員の拡幅	△	車道幅員拡大への対応
		地覆幅の改良	△	路肩部の建築限界確保 地覆幅：400, 500 ⇒ 600

凡例

○：可能

△：十分な検討、あるいは橋梁形式によって可能

×：不可能

図 6-5 に、直橋対応時のパネル割, ブロック割の
検討例を示す。

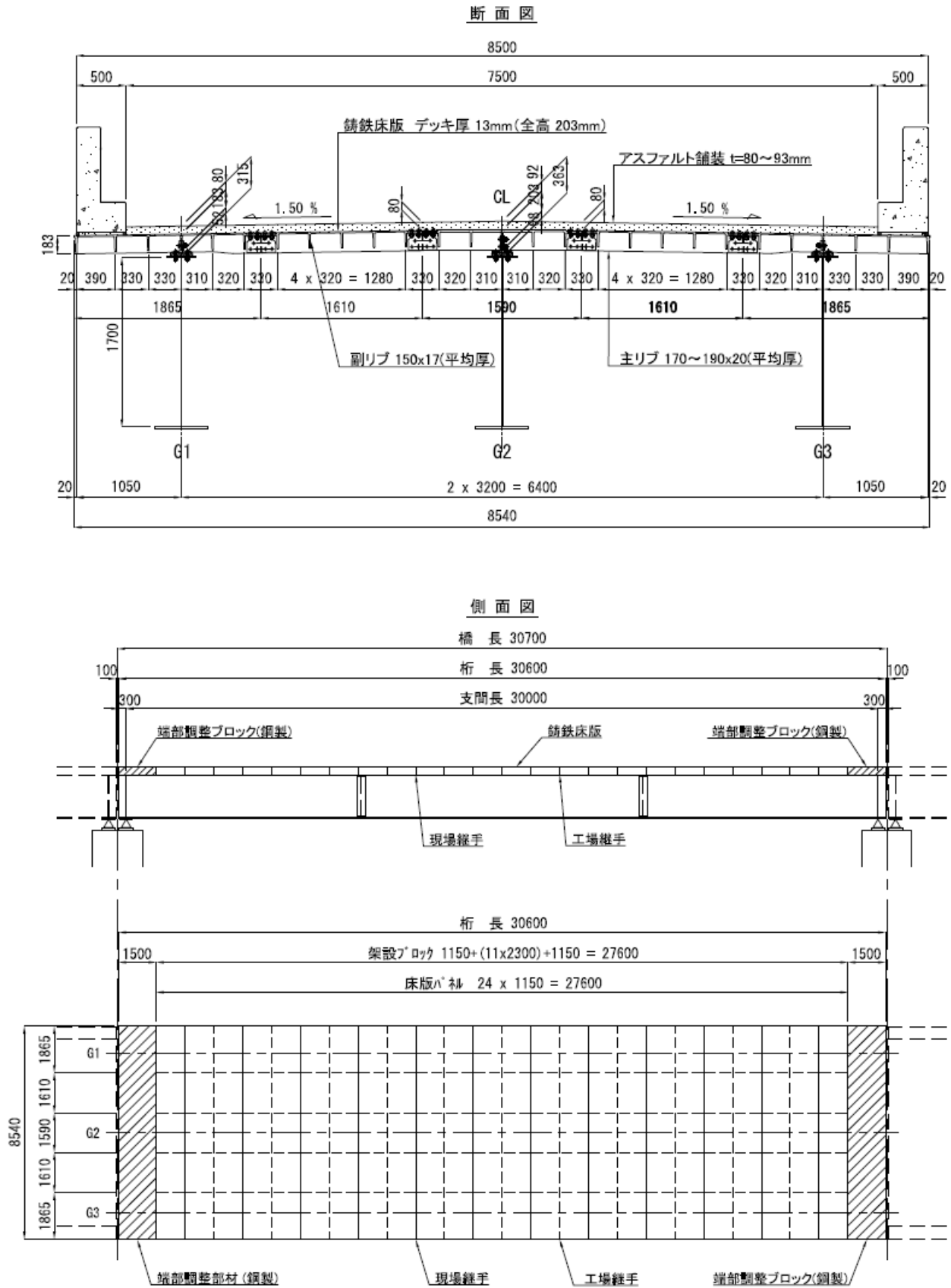


図 6-6 直橋対応時のパネル割, ブロック割検討例

図6-7に、直橋の桁端部の鋼製調整ブロックの検討例を示す。桁端部を鋼製とすることで、伸縮装置も一般的な取付け方法で施工可能となる。

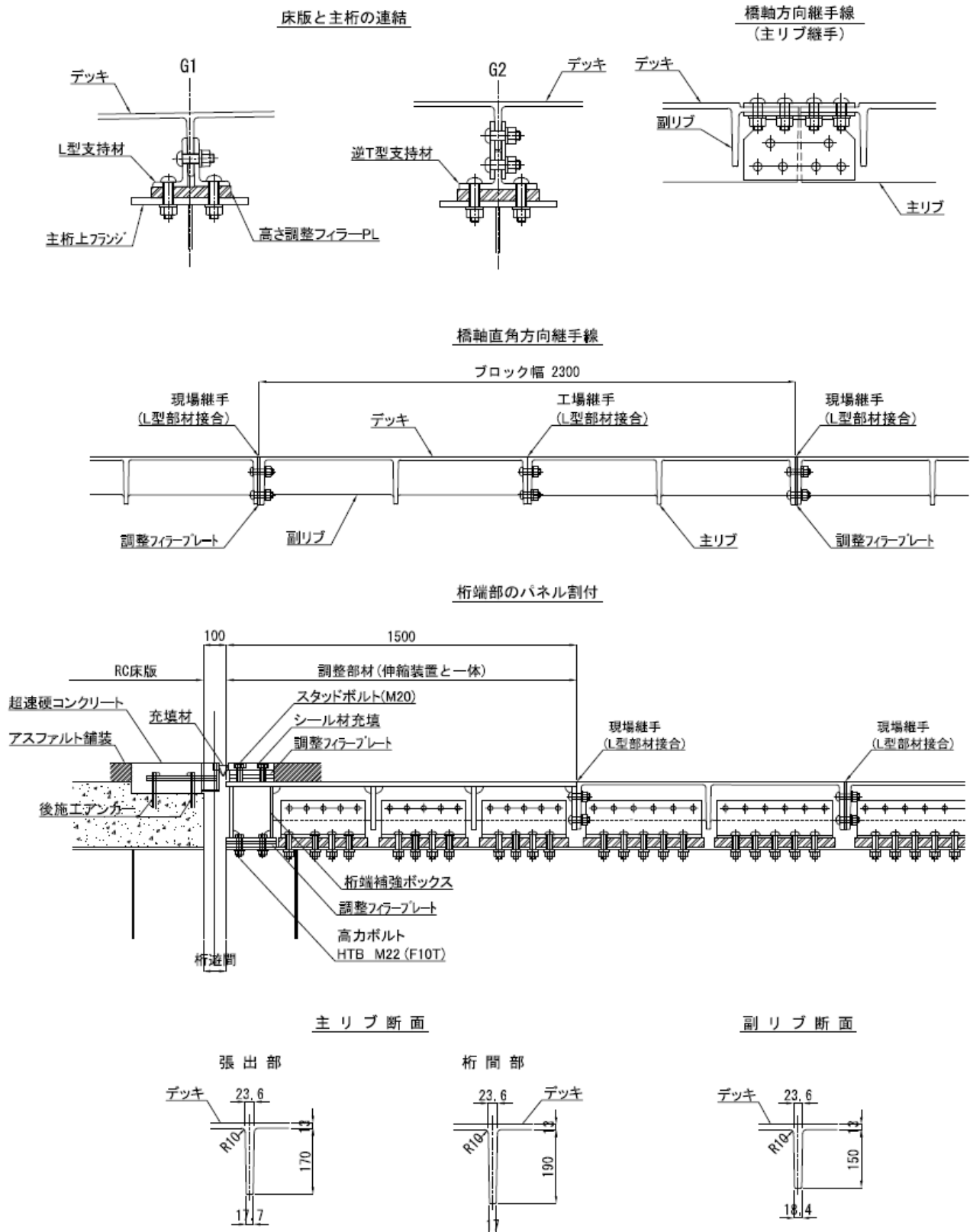


図 6-7 直線対応時の桁端部の検討例

図6-8に、曲率半径の大きな曲線橋で、桁配置は直線の場合の铸铁床版の設計例を示す。左右の張出長さが異なるが、床版は直線配置とし、地覆部を線形どおりの曲線とすることで対応可能と考える。

図6-9に、斜橋における桁端部の調整要領の設計例を示す。

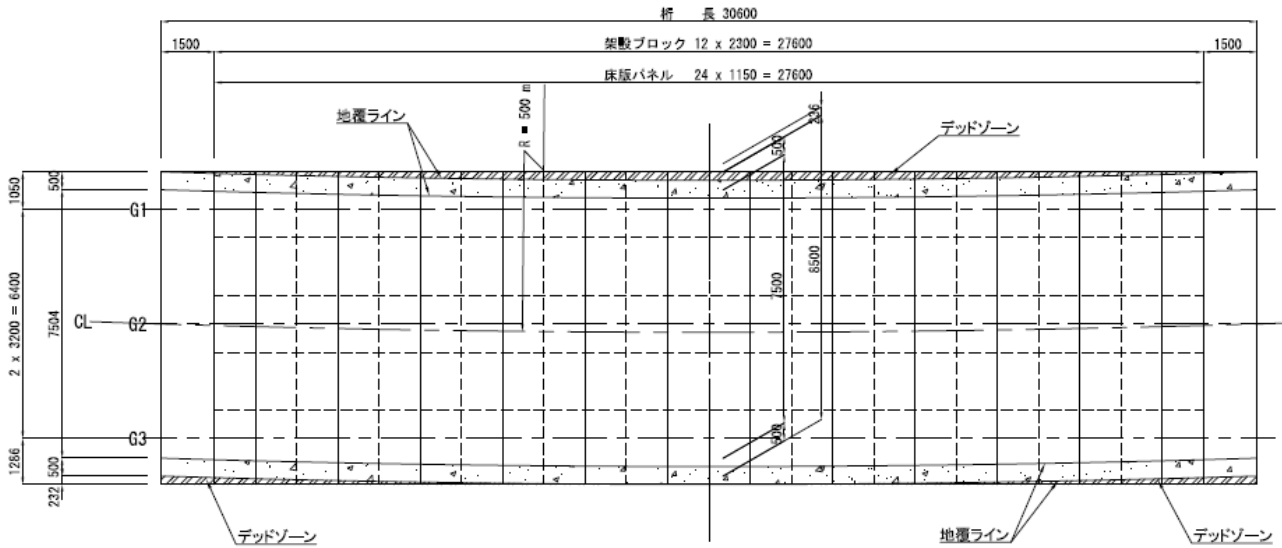


図 6-8 曲線の平面線形対応時の設計検討例（曲率半径 R=500m の場合）

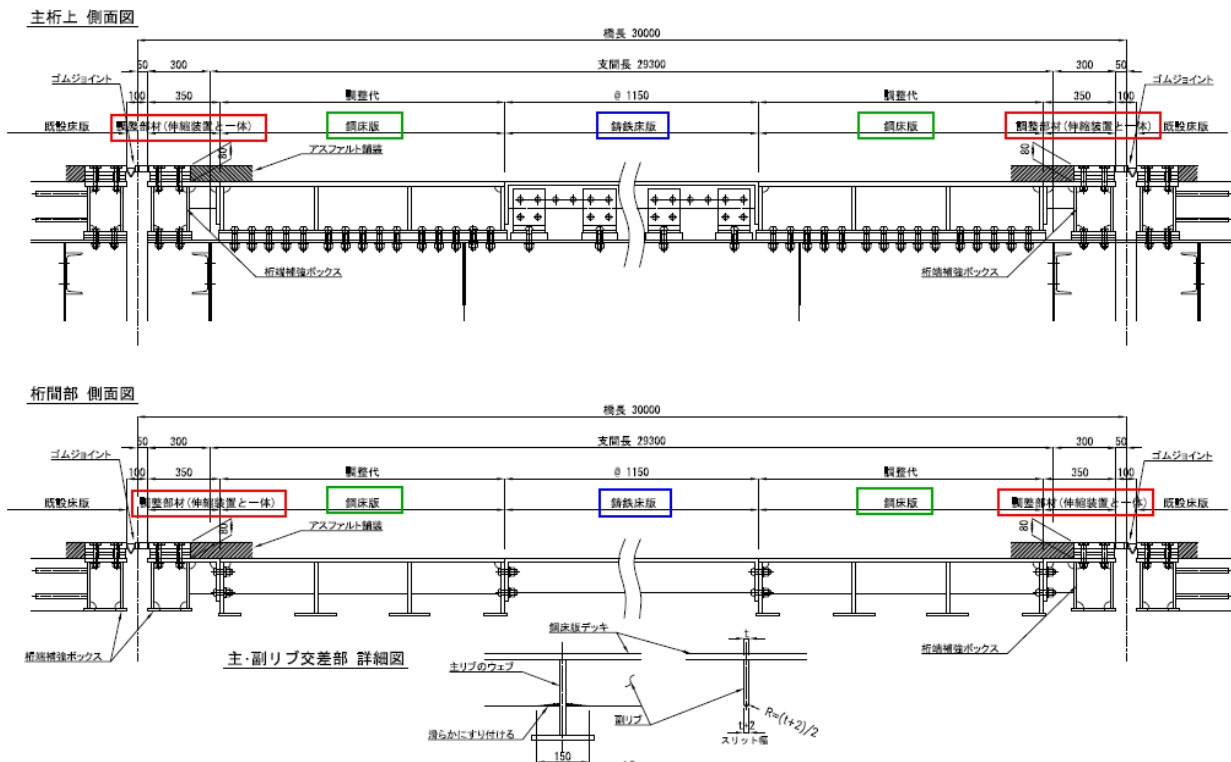


図 6-9 パネル割 桁端部の調整要領 設計検討例（斜橋）

図6-10と図6-11に、斜角90°と80°の場合の桁端調整部の設計例を示す。

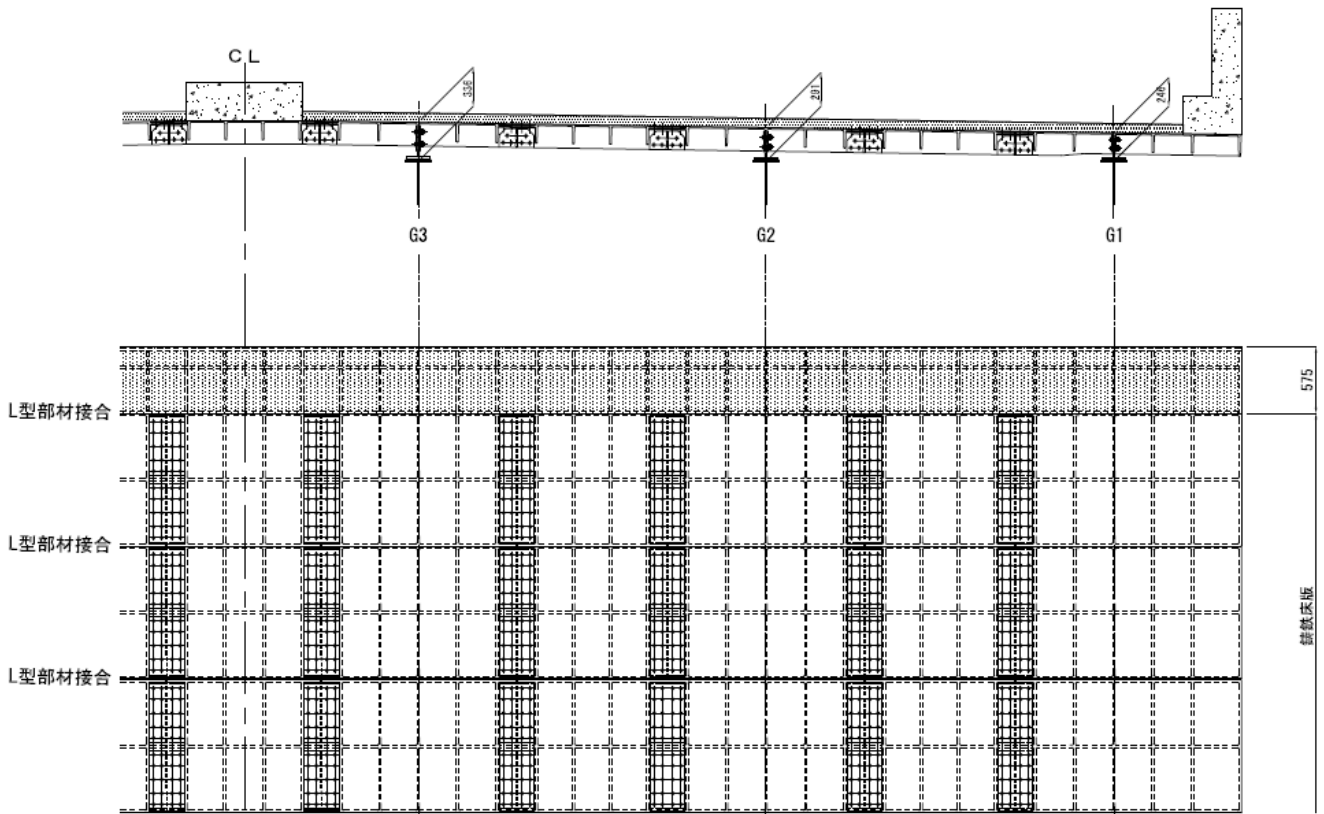


図 6-10 パネル割 桁端調整部 設計検討例 (斜角 90°)

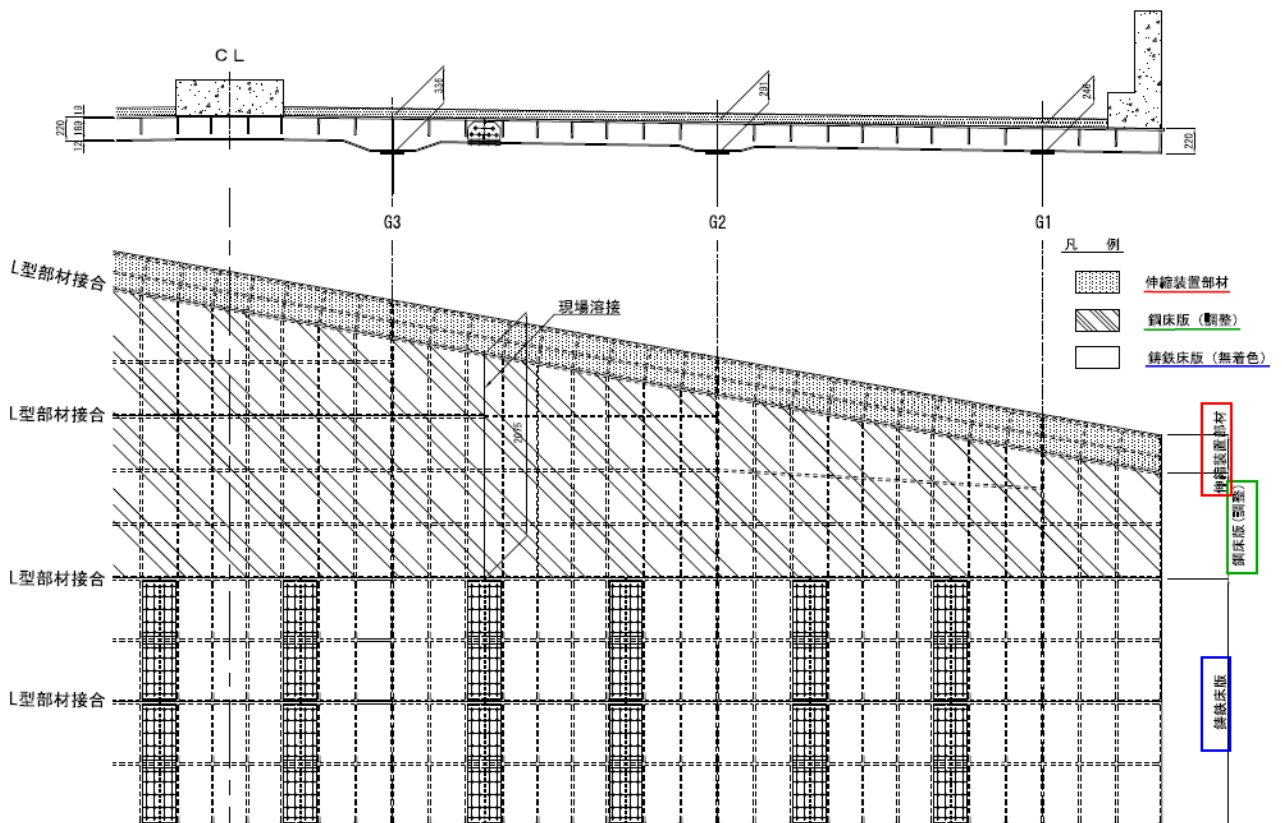


図 6-11 パネル割 桁端調整部 設計検討例 (斜角 80°)

図6-12に示す幅員拡幅に関する目的や課題は以下のとおり。

構造

- ・古い橋梁を拡幅し、活荷重を TL-20 から B 活荷重へ対応できるように改築することを目的
- ・張出拡幅部は方杖構造（サポート支持）として軽量化

課題

- ・床版は軽量化されるが、幅員増、活荷重強度アップの影響から、主桁、下部工の照査は必須

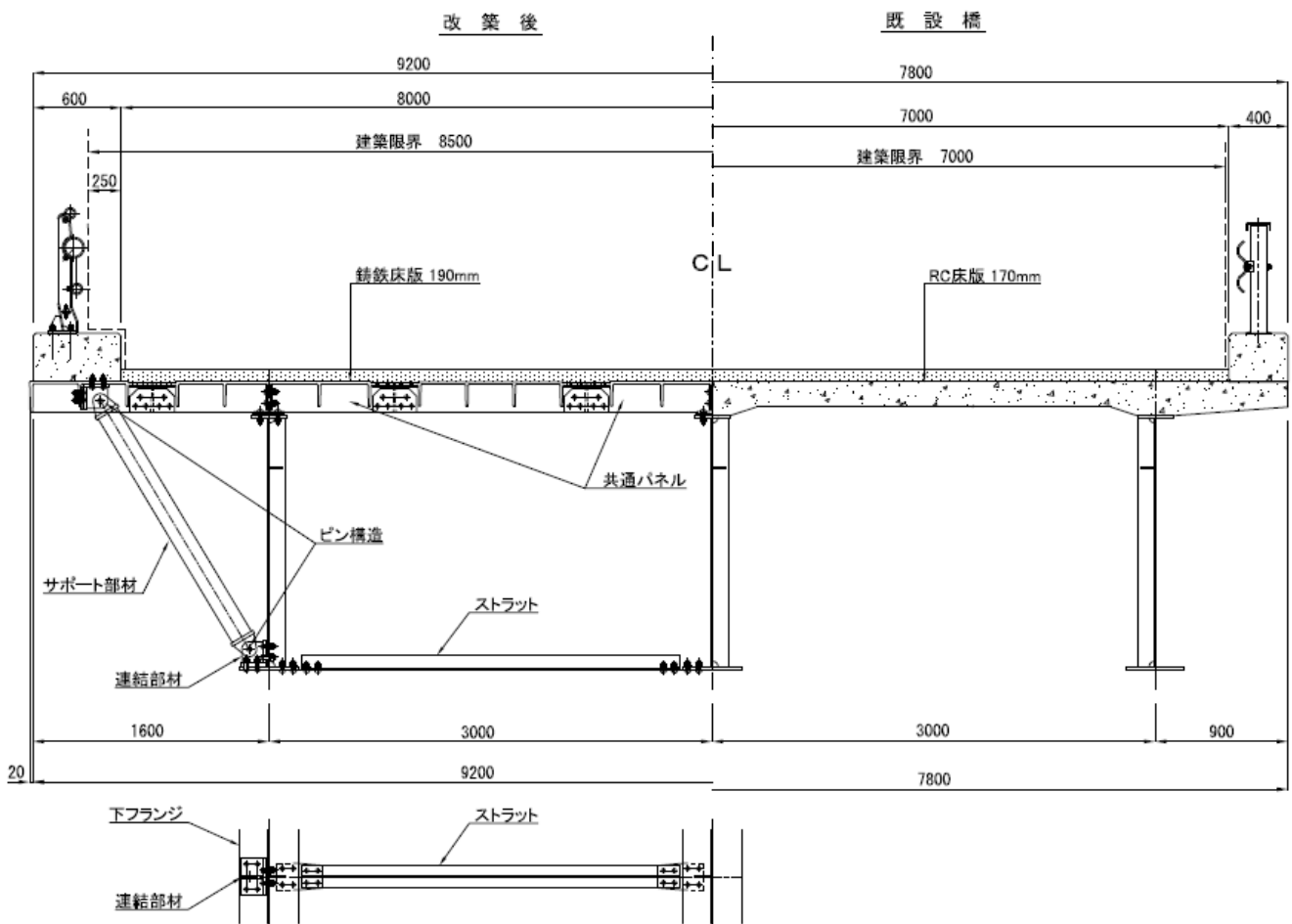


図 6-12 床版取替による幅員拡幅 設計検討例（有効幅員 7000mm⇒8000mm）

図6-13に示す地覆改良に関する目的や課題は以下のとおり。

構造

- ・古い橋梁の床版取替で，活荷重を TL-20 から B 活荷重へ対応できるように改築することを目的
- ・地覆幅は現行の一般的な 600mm（建築限界幅の増）

課題

- ・床版は軽量化されるが，地覆幅増，活荷重強度アップの影響から，主桁，下部工の照査は必須

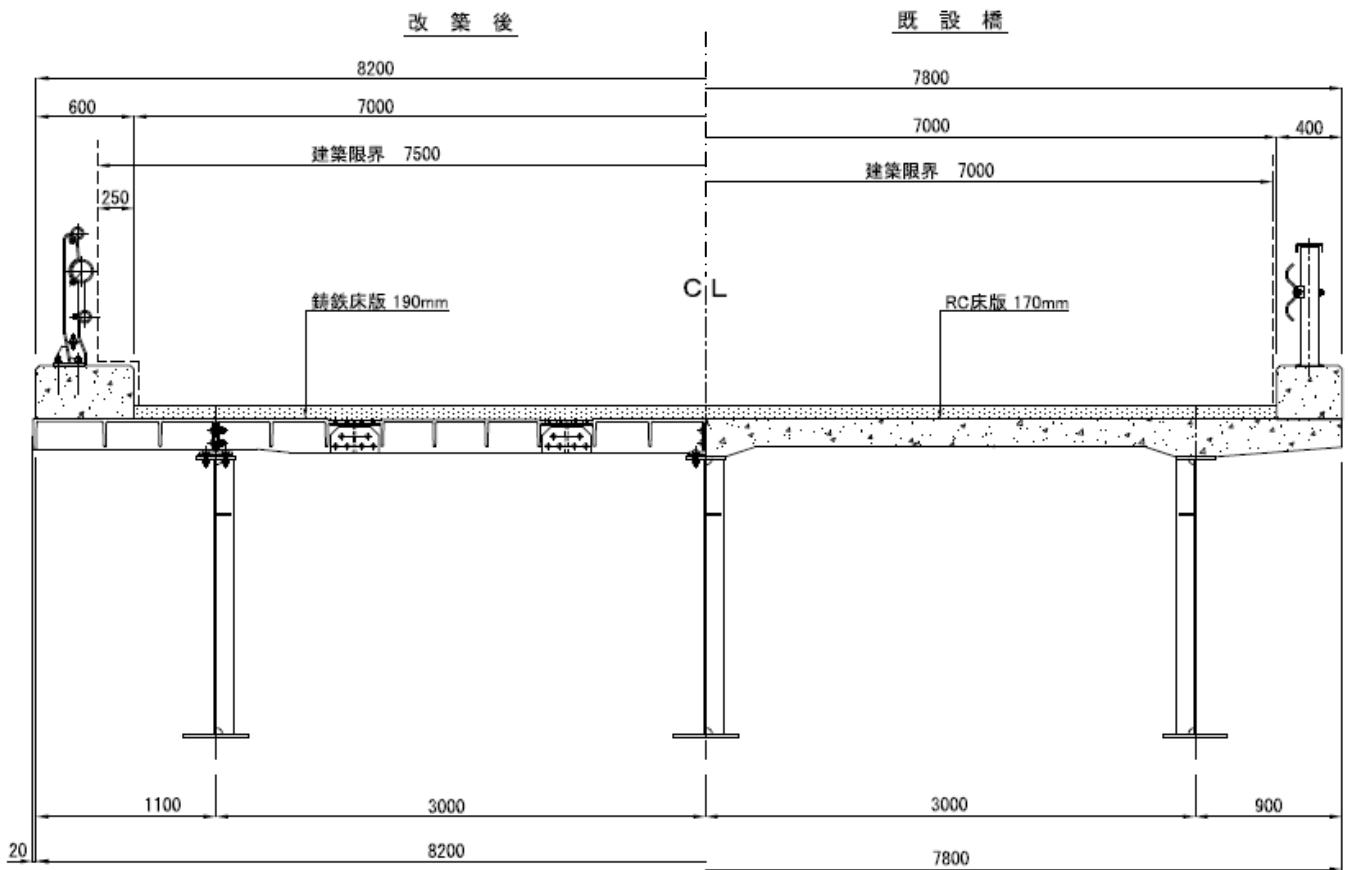


図 6-13 床版取替による地覆改良 設計検討例（建築限界を 500mm 拡張）

第7章 まとめ

7.1 研究で得られた成果

FS (H26 年度), 本格採択 (H27 年度~H29 年度) の研究成果を以下に示す.

(1) 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分かった.

(2) 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.

(3) 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実験を行い, 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と破壊に留まることを確認した.

- ・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．

(4) 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．

7.2 研究成果の活用方策

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，鑄物と鑄鉄（球状黒鉛鑄鉄）の特長を活かした鑄鉄床版の製造，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，研究成果である鑄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努力していきたい．

添付資料 床版更新時の設計例と特性評価

(1) 設計条件

設計例を示すため、床版更新を行う既設橋の設計条件を以下に示す。

a) 既設橋（昭和 39 年鋼道示で設計，施工）

橋梁形式：単純活荷重合成桁

舗装：アスファルト舗装 厚 75mm

床版形式：RC 床版 $18\text{cm} > 14\text{cm}$
 $\sigma_{ck} = 270 \text{ kg/cm}^2$

平面線形：R=∞

横断勾配：1.5%山形直線勾配

縦断勾配：レベル

総幅員：8.5m

有効幅員：7.5m

橋長：30.7m

支間長：30.0m

主桁本数：3本

主桁間隔：3200mm

横断寸法：1050+2×3200+1050=8500mm

使用鋼材：SM50，SS41

現場連結：HTB M22 (F10T)

車両防護柵：RC 壁高欄

荷重

死荷重：アスファルト舗装 2.3t/m^3
鉄筋コンクリート 2.5t/m^3

活荷重：TL-20

T 荷重 20t (床版設計荷重：8t)

L 荷重 P=5000kg/m

P=350kg/m²

温度変化：RC 床版と主桁の温度差±10℃

風荷重：略

地震荷重：略

適用基準：鋼道路橋設計示方書

(昭和 39 年 8 月) ²⁴⁾

既設橋へ更新設置する RC 床版と鑄鉄床版の設計条件を以下に示す。なお、記載は既設橋からの変更項目のみとする。

b) 既設橋から RC 床版に更新

1 方向当たりの大型車の計画交通量：
2000 台/日以上

床版形式：RC 床版 $\sigma_{ck} = 30\text{N/mm}^2$

床版厚： $d = k_1 \times k_2 \times d_0$

$d_0 = 30L + 110 \geq 160\text{mm}$

L：床版支間長 (m)

k1：大型車の交通量による係数 1.25

K2：付加曲げモーメントによる係数 1.00

①増し桁無し

L=3.2m

$d_0 = 206 \text{ mm} > 160 \text{ mm}$

d=260 mm

②増し桁有り

L=1.6m

$d_0 = 158 \text{ mm} < 160 \text{ mm}$

d=200mm

荷重：

死荷重：アスファルト舗装 22.5kN/m^3

鉄筋コンクリート 24.5kN/m^3

活荷重：B 活荷重

T 荷重 200kN

(床版設計荷重 100kN)

L 荷重 $p_1 = 10 (12) \text{ kN/m}^2$

$p_2 = 3.5\text{kN/m}^2$

適用基準：道路橋示方書 (平成 24 年 3 月) ⁶⁾

C) 既設橋から鑄鉄床版に更新

床版形式：鑄鉄床版

デッキ厚：13mm

0.2%耐力： $\sigma_y = 350\text{N/mm}^2$

許容応力度： $\sigma_a = \sigma_y / 1.7 = 205\text{N/mm}^2$

$$\tau_a = \sigma_y / \sqrt{3} / 1.7 = 115\text{N/mm}^2$$

荷重：

死荷重：アスファルト舗装 22.5kN/m³

鉄筋コンクリート 24.5kN/m³

鑄鉄床版 2.45kN/m²

主桁連結部 1.0kN/m²

活荷重：B活荷重

T荷重 200kN

(床版設計荷重 100kN)

L荷重 $p_1 = 10$ (12) kN/m²

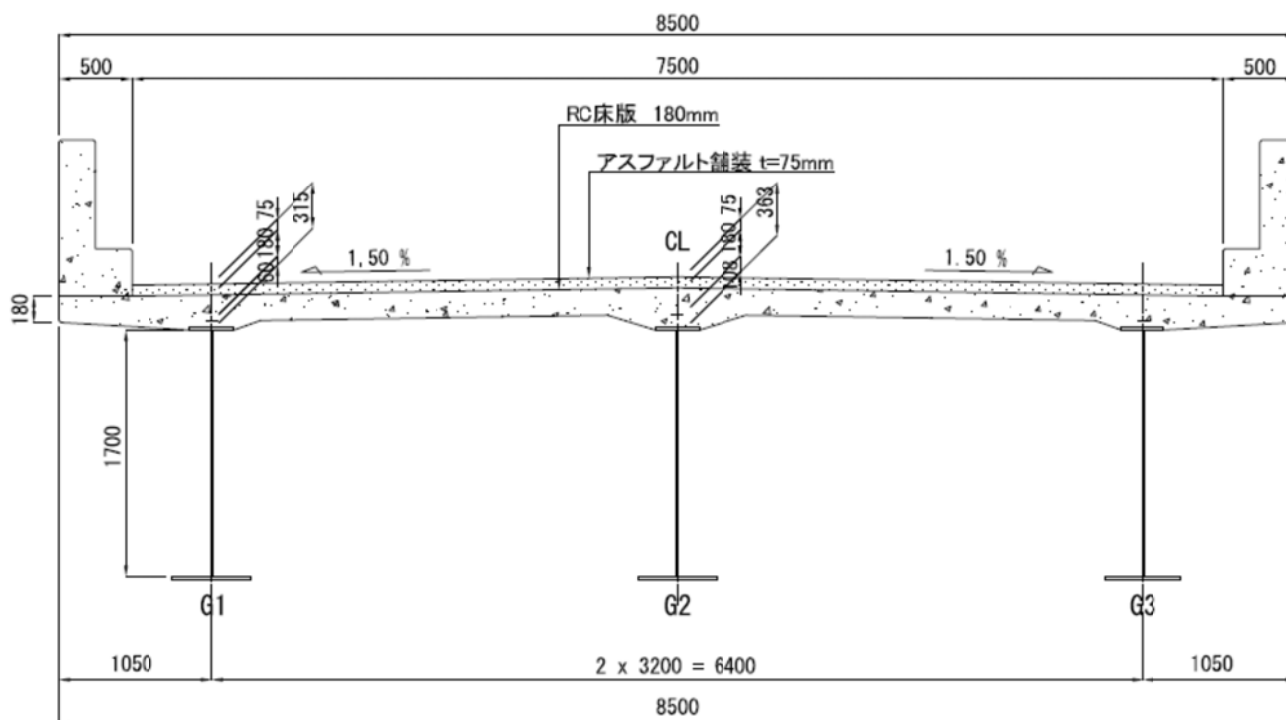
$$p_2 = 3.5\text{kN/m}^2$$

温度変化：床版と主桁の温度差±15℃

適用基準：道路橋示方書（平成24年3月）⁶⁾

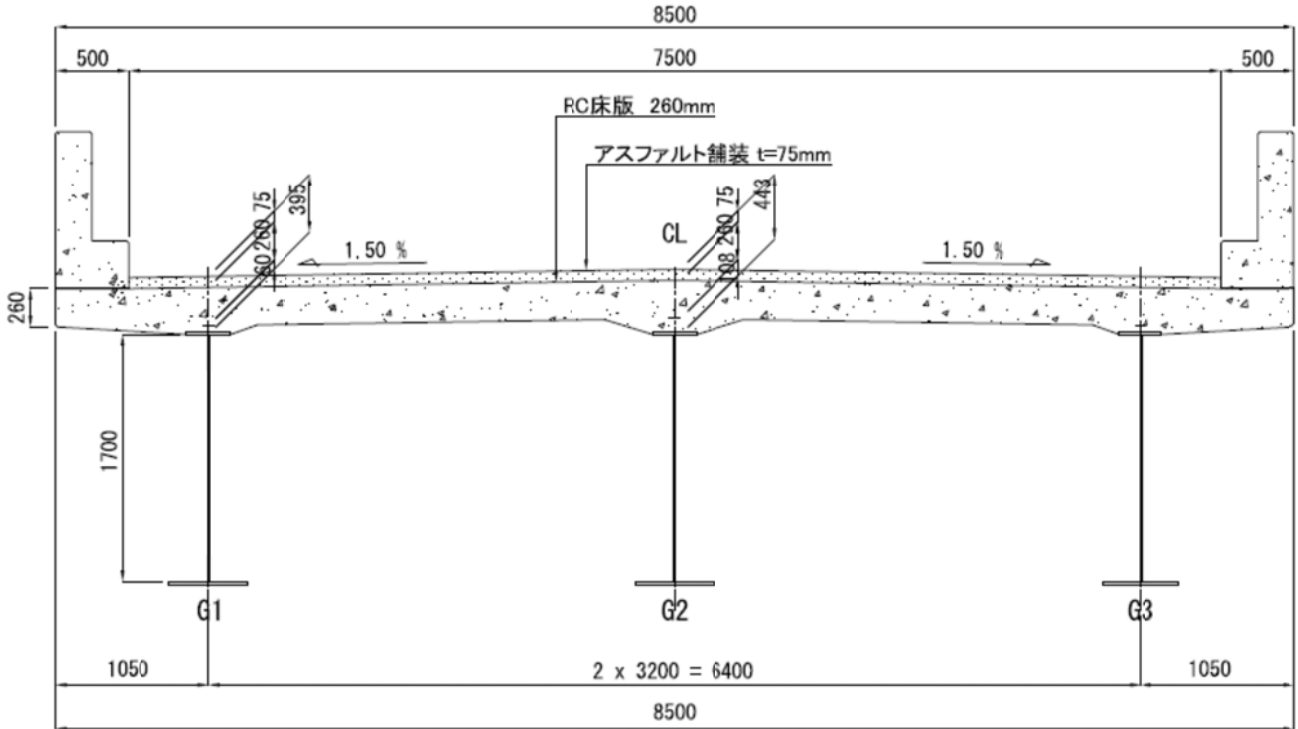
(2) 設計結果

前述の設計条件に基づく既設橋の概略設計図を図添-1に示す。

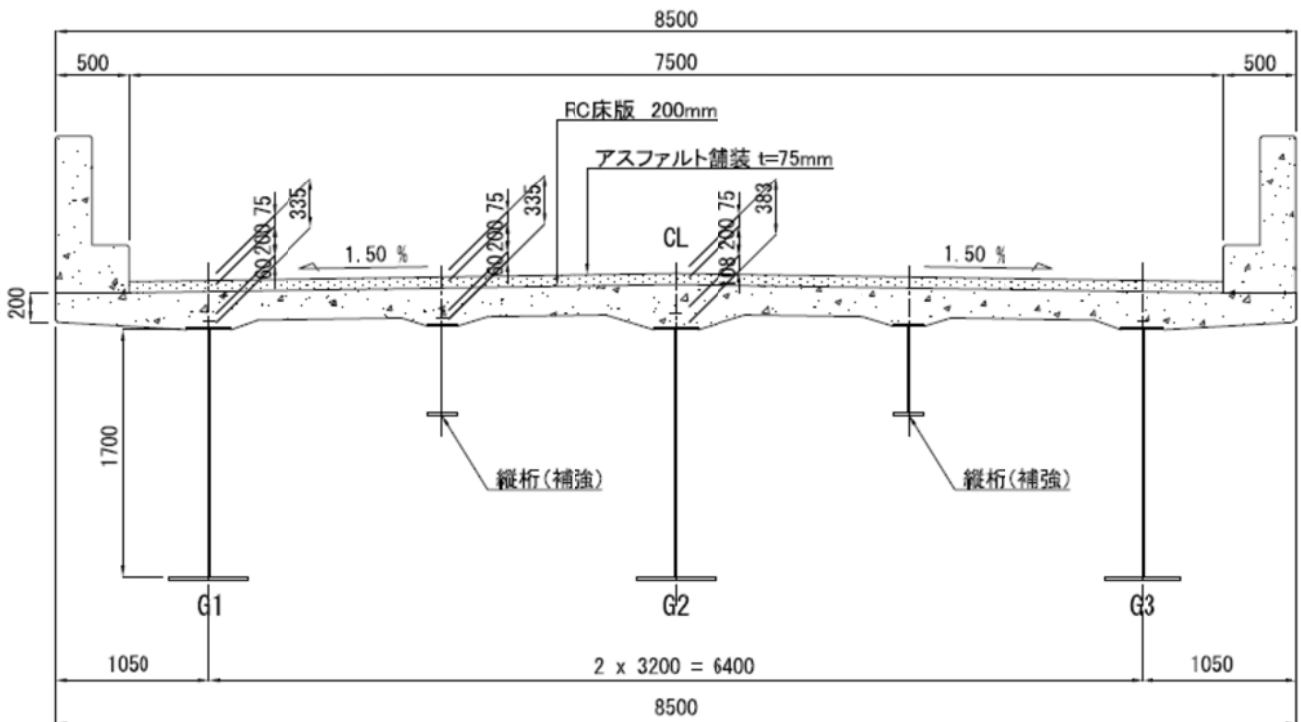


図添-1 既設橋 概略設計図（断面図）

既設橋からRC床版に更新する際の概略設計図を
 図添-2 と図添-3 に示す.



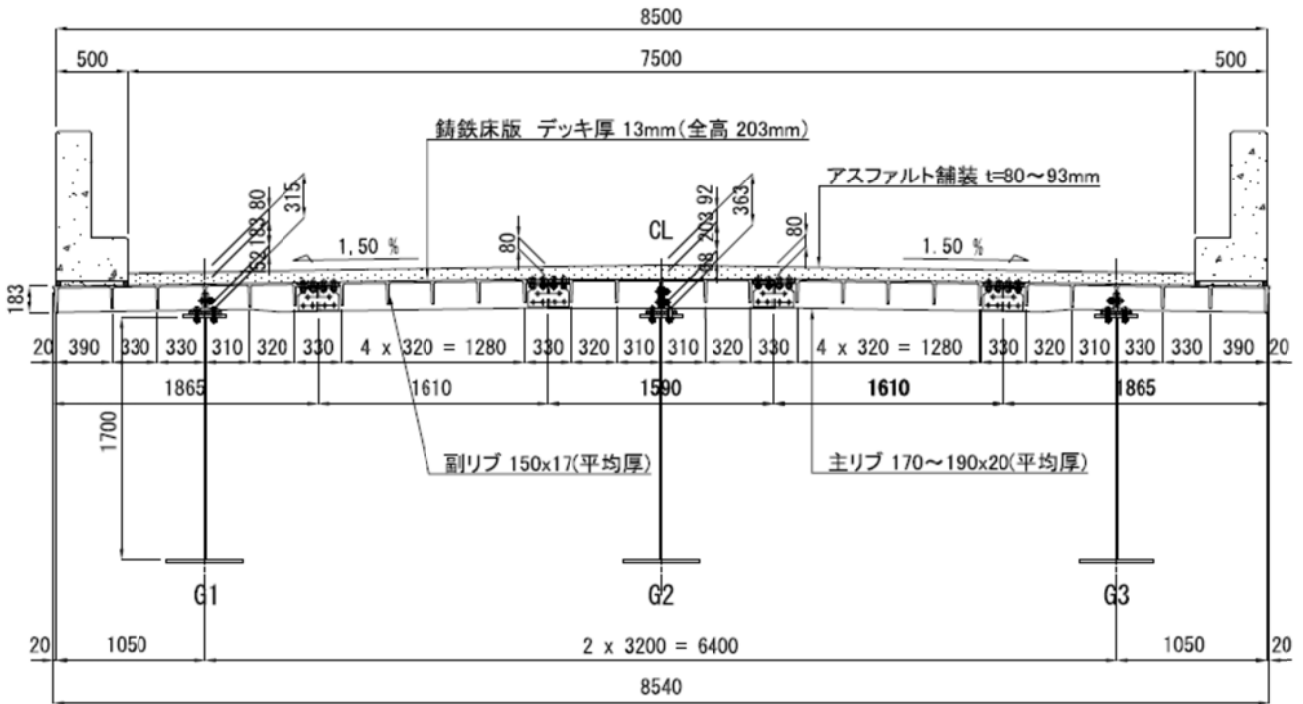
図添-2 RC床版／縦桁補強無し 概略設計図（断面図）



図添-3 RC床版／縦桁補強有り 概略設計図（断面図）

既設橋から鑄鉄床版に更新する際の概略設計図を図添-4に示す。

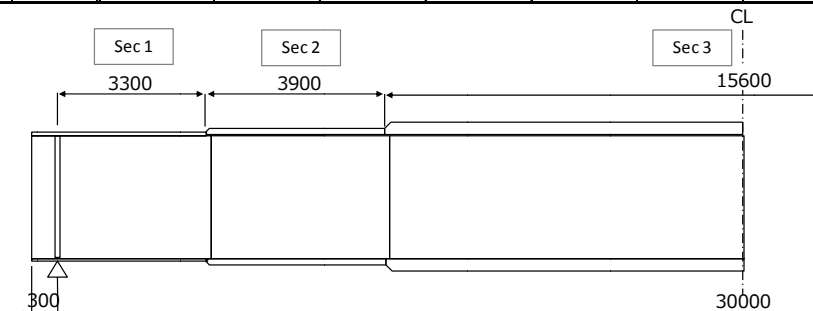
既設橋、RC床版への更新（縦桁無し）、RC床版への更新（縦桁有り）、鑄鉄床版への更新の4パターンでの断面力の概略設計結果の表添-1に示す。



図添-4 鑄鉄床版 概略設計図（断面図）

表添-1 概略設計結果（断面力）

断面力 〈曲げモーメント〉		既設橋梁		更新 RC床版(縦桁 無し)		更新 RC床版(縦桁 有り)		更新 鑄鉄床版		
		G1(外桁)	G2(内桁)	G1(外桁)	G2(内桁)	G1(外桁)	G2(内桁)	G1(外桁)	G2(内桁)	
合成前	Msd	Sec 1	895	855	1174	1092	990	891	505	478
		Sec 2	1673	1580	2198	2014	1856	1637	943	885
		Sec 3	2324	2104	3063	2659	2601	2129	1304	1188
合成後	Mvd	Sec 1	385	169	391	156	422	200	530	307
		Sec 2	675	400	688	372	747	452	947	656
		Sec 3	716	965	745	907	832	1003	1095	1304
	MvL+i	Sec 1	893	1031	1214	1340	1216	1336	1218	1334
		Sec 2	1715	1823	2329	2369	2333	2359	2337	2354
		Sec 3	2548	2170	3450	2823	3462	2808	3470	2804
	Mv	Sec 1	1278	1200	1605	1496	1638	1536	1748	1641
		Sec 2	2390	2223	3017	2741	3080	2811	3284	3010
		Sec 3	3264	3135	4195	3730	4294	3811	4565	4108



既設橋，RC床版への更新（縦桁無し），RC床版への更新（縦桁有り），鋳鉄床版への更新の4パターンの反力とたわみの概略設計結果を表添-2と表添-3に示す。

表添-2 概略設計結果（反力）

支点反力 (kN)		既設橋梁		更新 RC床版(縦桁 無し)		更新 RC床版(縦桁 有り)		更新 鋳鉄床版	
		G1(外桁)	G2(内桁)	G1(外桁)	G2(内桁)	G1(外桁)	G2(内桁)	G1(外桁)	G2(内桁)
死荷重	R_d	440	340	537	418	484	365	357	258
活荷重	R_{L+i}	296	369	452	536	453	535	453	534
合計	ΣR	736	709	989	954	937	900	810	792
比率	死荷重	1.00	1.00	1.22	1.23	1.10	1.07	0.81	0.76
	合計	1.00	1.00	1.34	1.35	1.27	1.27	1.10	1.12

下部工設計反力 (kN)		既設橋梁		更新 RC床版(縦桁 無し)		更新 RC床版(縦桁 有り)		更新 鋳鉄床版	
死荷重	R_d	1220		1491		1333		972	
活荷重	R_L	660		991		991		991	
合計	ΣR	1880		2482		2324		1963	
比率	死荷重	1.00		1.22		1.09		0.80	
	合計	1.00		1.32		1.24		1.04	

表添-3 概略設計結果（たわみ）

たわみ (mm)		既設橋梁		更新 RC床版(縦桁 無し)		更新 RC床版(縦桁 有り)		更新 鋳鉄床版	
		G1(外桁)	G2(内桁)	G1(外桁)	G2(内桁)	G1(外桁)	G2(内桁)	G1(外桁)	G2(内桁)
死荷重	δ_d	75.6	74.5	76.1	75.2	72.2	71.3	48.9	47.8
活荷重	δ_L	16.6	13.9	17.1	14.7	19.1	16.3	22.4	19.0
	δ_a	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
比率 (/ 既設)	死荷重	1.00	1.00	1.01	1.01	0.96	0.96	0.65	0.64
	活荷重	1.00	1.00	1.03	1.06	1.15	1.17	1.35	1.37

(3) 施工期間

施工期間の試算結果を図添-5に示す。

工種	所要日数	施工工程			備考	
鉄 床 版	準備工	10.0				
	足場工	4.0	設置		解体	足場工
	主桁補強工	-				補強部材・当て板
	床版撤去工	8.8				既設床版の切断・撤去
	桁架設工	-				縦桁・横桁
	床版工	16.6				取替床板
	橋面工	2.7				伸縮装置・舗装
	後片付け	10.0				
	日	0	30	60	90	
	全体工期		50日			
足場工供用期間		30日				
規制期間		26日			赤線部工程	
R C 床 版 （ 縦 桁 補 強 無 し ）	準備工	10.0				
	仮設工	4.0	設置		解体	足場工
	主桁補強工	14.7				補強部材・当て板
	床版撤去工	8.8				既設床版の切断・撤去
	桁架設工	-				縦桁・横桁
	床版工	17.9				取替床板
	橋面工	2.7				伸縮装置・舗装
	後片付け	10.0				
	日	0	30	60	90	
	全体工期		63日			
足場工供用期間		43日				
規制期間		30日			赤線部工程	
R C 床 版 （ 縦 桁 補 強 有 り ）	準備工	10.0				
	仮設工	4.0	設置		解体	足場工
	主桁補強工	12.7				補強部材・当て板
	床版撤去工	8.8				既設床版の切断・撤去
	桁架設工	13.1				縦桁・横桁
	床版工	17.2				取替床板
	橋面工	2.7				伸縮装置・舗装
	後片付け	10.0				
	日	0	30	60	90	
	全体工期		68日			
足場工供用期間		48日				
規制期間		37日			赤線部工程	

注)

1. 急速施工であり不稼働率は見込んでいない。
2. 所要日数は8hr/1日としている。

図添-5 施工期間試算結果

参考文献

- 1) NEXCO 東日本, NEXCO 中日本, NEXCO 西日本 : 「東・中・西日本高速道路の更新計画について」, <http://www.mlit.go.jp/common/001066097.pdf> (参照日 2016. 6. 22)
- 2) 社団法人 日本橋梁建設協会 : 「日本と米国における取替え鋼床版事例の調査報告」, http://www.jasbc.co.jp/images/imageparts/title/release/ronbun/2014/H26_001.pdf (参照日 2017. 4. 25)
- 3) 鋼構造委員会・鋼床版の疲労改訂小委員会 : 鋼床版の疲労 [2010 年改訂版], 鋼構造シリーズ 19, 土木学会, 2010.
- 4) 菅沼久忠, 三木千壽 : 鋼床版のデッキプレート・トラフリブ間の縦方向溶接部の疲労に対する EFFECTIVE NOTCH STRESS による評価, 土木学会論文集 A, Vol. 63 No. 1, pp. 35-42, 2007.
- 5) 三木千壽, 菅沼久忠, 富澤雅幸, 町田文孝 : 鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因, 土木学会論文集, No. 780 / I-70, pp. 57-69, 2005.
- 6) 公益社団法人 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, 2012. 3
- 7) 一般財団法人 日本規格協会 : 球状黒鉛鉄品 JIS G 5502, 2007.
- 8) 一般財団法人 日本規格協会 : 金属材料引張試験方法 JIS Z 2241, 2011.
- 9) 一般財団法人 日本規格協会 : ブリネル硬さ試験 - 試験方法 JIS Z 2243, 2008.
- 10) 小林俊郎, 原田昭治 : 球状黒鉛鉄の強度評価, 株式会社アグネ技術センター発行, 1999. 12
- 11) 鉄の生産技術教本編集部 : 鑄造技術シリーズ 3 鉄の生産技術, 財団法人 素形材センター発行, 1993. 1
- 12) 社団法人 日本鑄造工学会 : 鑄造工学便覧, 丸善株式会社発行, 2002. 1
- 13) 塩田俊雄, 旗手稔, 竹本勝昭 : 球状黒鉛鉄の静的及び疲労強度に及ぼす鑄肌表面粗さの影響, 鑄造工学 vol. 69, pp. 904-910, 1997.
- 14) 岸本秀弘, 小倉興一, 栗津重男 : Si 添加による球状黒鉛鉄の疲労強度に及ぼす鑄肌及びショットピーニングの影響, 材料 第 21 巻 第 221 号, pp. 104-108, 1972. 2
- 15) 松崎拓治, 野口徹, 中村孝, 五家政人 : フェライト地球状黒鉛鉄の疲労強度に及ぼす鑄肌の影響, 社団法人日本材料学会 学術講演会講演論文集 45, pp. 25-26, 1996.
- 16) 社団法人 日本下水道協会 : 下水道用鉄製マンホールふた〈呼び径 300~900〉JSWAS G-4, 2009. 3.
- 17) 関口幹夫 : 輪荷重走行疲労試験機を用いた道路橋床版の共通試験, 東京都土木技術センター 年報, pp. 67-78, 2006.
- 18) 社団法人 日本橋梁建設協会 : デザインデータブック, 2011. 4.
- 19) 一般財団法人 日本規格協会 : 熱間圧延鋼板および鋼帯の形状, 寸法, 質量およびその許容差, JIS G 3193, 2008.)
- 20) 社団法人 日本道路協会 : 鋼道路橋塗装・防食便覧, 2006. 2.
- 21) 社団法人 日本橋梁建設協会 : 鋼橋のライフサイクルコスト, 技術短信, No. 10, 2009. 10. 5.

- 22)一般社団法人 建設物価調査会：国土交通省土木工事積算基準 平成 29 年度版，2017. 5.
- 23)那須太郎，竹内貴司，酒井亮，笠原俊彦，石原達也，河村康文，三浦一浩：東京国際空港 D 滑走路島ジャケット式栈橋における 100 年間の鋼材防食システム，公益社団法人 土木学会 第 65 回年次学術講演会，VI-117，2010. 9.
- 24)社団法人 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書／鋼道路橋製作示方書 解説，1956. 5.

原稿受理日？