

明治橋の損傷度把握と補修案策定に向けた構造解析

Structural analysis towards the degree grasps of Material damage and repair proposal decision for the MEIJI-BASHI Bridge

中原 智法*, 野瀬 智也**, 山口 浩平***, 杉原伸泰****

Tomonori NAKAHARA, Tomoya NOSE, Kouhei YAMAGUCHI, Nobuyasu SUGIHARA

*工修 日本橋梁(株) 技術開発部 (〒675-0164 兵庫県加古郡播磨町東新島3番地)

**工修 JIPテクノサイエンス(株) 福岡テクノセンタ (〒810-0004 福岡市中央区渡辺通3-6-11)

***博(工) 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

****博(工) 日立造船鉄構(株) 橋梁設計2課 (〒592-8331 堺市西区築港新町1-5-1)

MEIJI-BASHI bridge is two steel I-section girders, constructed in 1902. It has historic and cultural values, superstructure using a trough-shaped steel concrete slab and a J-shaped stiffener, substructure using drainer shape by being an unusual stone pier. However, corrosion of iron and steel materials advances with progress of time, and big transformation has developed it in a part of a slab constitution member.

This paper was based on a result of structure / damage degree investigation and strength / ingredient investigation of use materials that we carried out in a past fiscal year for these damage and calculated survival proof stresses by analytic technique.

Key Words : historical steel bridge, damage grasp, trough-shaped steel slab, repair proposal

キーワード：歴史的鋼橋、損傷度、トラフ形鋼床版、補修計画

1. はじめに

明治橋は図-1に示すように単純桁2連から成る2径間の鋼2主I桁橋である。建設は1902(明治35)年であり、上部工はトラフ形鋼コンクリート床版やJスティフナーを使用していること、下部工は水切り形状に特徴のある石造橋脚であること等から、文化財的な価値を有している。しかしながら、年月の経過と共に鉄鋼材料の腐食が進み、また、床版構成部材の一部に大きな変形が生じている。

本論文は、これらの損傷に対して、過年度に実施し

た構造・損傷度調査^{1),2)}や使用材料の強度・成分調査³⁾の結果に基づき、解析的な手法による残存耐力等の算出、および供用を前提とした補強・補修の要否の検討を行ったものであり、明治橋が文化財的な価値を有していることから、文化財的価値を失わないことを念頭に置いている。補強については、供用継続という観点から、現状における補強の要否を検討している。補修については、鉄鋼材料の腐食や床版の変形等の部分的な損傷に起因する耐力低下を想定し、補修の要否を検討している。

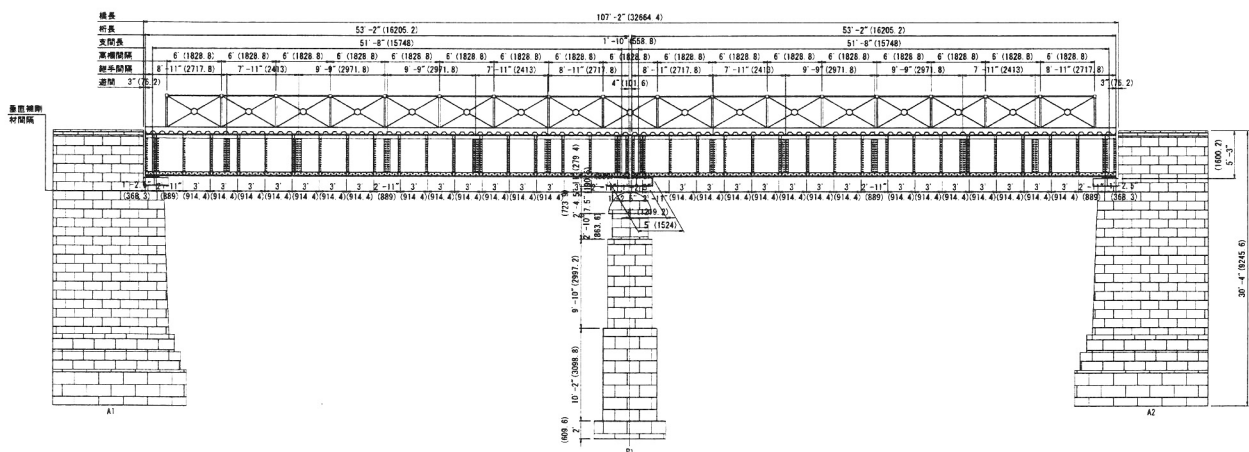


図-1 明治橋側面図

2. 建設当時の設計法の再現

明治橋は建設当時の設計図書が失われているため、設計荷重をはじめとする設計思想や耐力等に不明な点が多い。しかしながら、補強・補修を検討する上で、建設時の設計の考え方は非常に重要である。

明治橋が建設された1902年時点では、国内で鋼道路橋の設計方法が確立していたとは考え難く、海外の設計方法を参考にしたと考えられる。垂直補剛材に使用しているJスティフナーや床版に使用されているトラフ形鋼の輸入元より、英国の技術が使われていると考えられる。ここでは、当時の英国の橋梁技術についての文献「THE DESIGN OF SIMPLE STEEL BRIDGES」⁴⁾を参考にしながら、明治橋の構造や設計計算について検討する。

2.1 床版の設計

床版は、主桁間隔を支間方向とする上下に組み合わせたトラフ形鋼、トラフ形鋼どうしを固定するためのリベット、および無筋コンクリートから構成されている。構造・損傷度調査¹⁾により図-2に示す構造寸法であることが判っている。なお、建設当時の舗装の有無は判っていないが、英国の例を参考に砂利による舗装が行われていたと想定し、舗装厚は2" (50.8mm)とした。明治橋に使用されているトラフ形鋼は、英国のDORMAN LONG社製であり、形鋼の組み方は異なるが、図-3に示す同社のカタログにも同寸法のトラフ形鋼が記載されている。

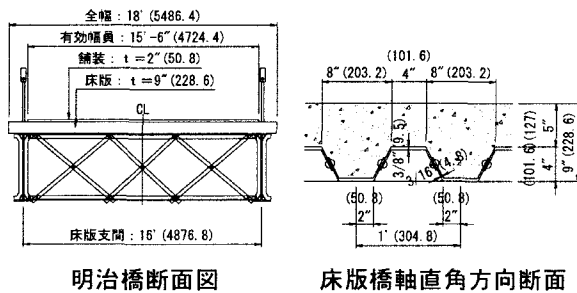


図-2 床版の構造

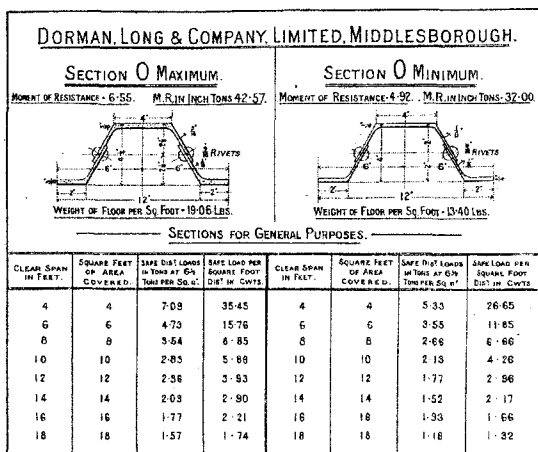


図-3 DORMAN LONG社の小型トラフ形鋼カタログ⁵⁾

トラフ形鋼を使用した床版の設計方法としては、トラフ形鋼1組を単位幅(明治橋のトラフ形鋼では12" (304.8mm))とした梁の断面計算が行われていたようである。トラフ形鋼は横桁を床版支間とする橋軸方向に配置されることが一般的であり、明治橋のように橋軸直角方向に配置されていることは珍しい。また、当時は合成桁という思想はないため、コンクリートとの合成効果は期待していないと考えられる。

表-1 トラフ形鋼床版の断面性能(非合成)

	1組あたり (12")	1.0mあたり (1/m)
断面二次モーメント (cm ²)	510	1673
トラフ形鋼断面定数 (cm ³)	100.4	329.3

設計荷重、特に活荷重強度については、英国において自動車荷重が考慮され始めたばかりの頃である。国内の規定では、「国道の築造標準」(内務省訓令第13号)1886年に400貫/坪(4.45kN/m²)の記載があるが車両荷重については定められていない。また、「道路構造令および街路構造令」(内務省令)1919年には、国道の基準として12貫/尺²(4.80kN/m²)と自動車荷重2100貫(77.18kN)が定められている。なお、主桁と床組の荷重強度の区別はなく、衝撃係数も規定されていない。

設計を再現するにあたり、荷重強度は以下のように考えた。床版は、トラフ形鋼(77.0kN/m³)とコンクリート(23.0kN/m³)を床版全厚で平均して20.9kN/m³とした。舗装は、現在のアスファルト舗装(22.5kN/m³)と同等とした。活荷重は、1919年の道路構造令を参考にして等分布荷重4.80kN/m²と考えた。これらの荷重強度を使用した床版の断面計算結果を表-2に示す。

表-2 床版応力度(活荷重:等分布荷重)

	厚さ (mm)	単位重量 (kN/m ³)	単位荷重強度 (kN/m ²)	断面力 (kN·m/m)	トラフ応力度 (N/mm ²)
床版	228.6	20.9	4.78	14.21	43.15
舗装	50.8	22.5	1.14	3.39	10.29
活荷重			4.80	14.27	43.33
合計				31.87	96.77

トラフ形鋼の許容応力度は、前述のカタログより6.5tf/inch²(98.7N/mm²)が使用されていたと考えられる。活荷重を等分布荷重とした場合のトラフ形鋼の作用応力度は96.8kN/mm²であり、想定した荷重強度は妥当であると考えられる。

一方、活荷重の載荷方法として、輪荷重(現在のT荷重)を想定した場合を考える。文献4)には輪荷重の載荷方法と床版の分担幅が示されている。これを明治橋にあてはめると、図-4および図-5のようになる。橋軸方向への輪荷重の分布幅は、輪荷重載荷中心から舗装厚を含めた片側45°分布と仮定されており、明治橋に適用すると上下に組み合わせたトラフ形鋼の高さ中心でおよそ18" (457.2mm)の幅になり、トラフ形鋼1.5組で分担することとなる。なお、文献4)に載荷さ

れている荷重は、前輪軸重が 2.5tf (24.5kN)、後輪軸重が 14tf (137.2kN)であるが、明治橋の床版にこの荷重を載荷すると、トラフ形鋼の許容応力度を大幅に超過するため、1輪あたりの荷重は $P=0.4\text{tf}$ (3.92kN) とする。これは、自動車総重量が 1.0tf (9.8kN) 程度に相当する。この荷重強度を使用した床版の断面計算結果を表-3に示す。活荷重を輪荷重とした場合のトラフ形鋼の作用応力度は 109.2kN/mm^2 であり、許容応力度を少し超過する結果となる。このことから、明治橋の床版の設計には、輪荷重を使用していないと推測される。

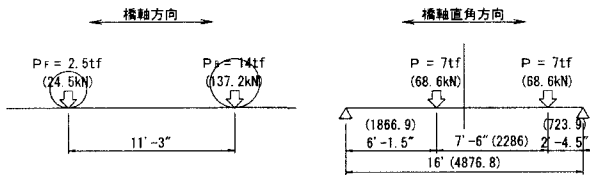


図-4 輪荷重載荷方法

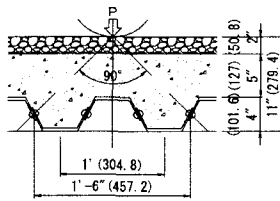


図-5 輪荷重の分布

表-3 床版応力度 (活荷重: 輪荷重)

	厚さ (mm)	単位重量 (kN/m ³)	単位荷重強度 (kN/m ²)	断面力 (kN・m/m)	トラフ応力度 (N/mm ²)
床版	228.6	20.9	4.78	14.21	43.15
舗装	50.8	22.5	1.14	3.39	10.29
活荷重		3.92 kN (1輪あたり)		5.60	55.78
合計				23.20	109.22

注) 活荷重の断面力はトラフ形鋼1組 (幅18") あたりを示す。

2. 2 桁の設計

明治橋建設当時の橋梁設計法では、格子解析等の解

析的手法は用いられておらず、梁理論によって断面力を算出している。文献4)によると、鉄道橋の設計では、活荷重を連行荷重として載荷し、影響線を利用して断面力を算出している。道路橋の設計においては、活荷重を等分布荷重として載荷し、断面力を算出しているようである。応力度を算出する断面計算は、現在使用されている方法と同様である。

明治橋は同支間の単純桁2連から構成される2径間の橋梁であり、主桁断面は支間中央で対称となっている。構造・損傷度調査¹⁾での板厚は、経年変化における腐食等の影響から建設当時から減少していると考えられるため、この点を考慮して建設当時の板厚を推定すると、図-6および図-7のようになる。明治橋の主桁フランジは数枚の鋼板を重ねて構成されており、3種類の断面に分類できる。各断面の断面性能を表-4に示す。なお、非合成桁と考えて床版の剛性や応力分担は考慮していない。

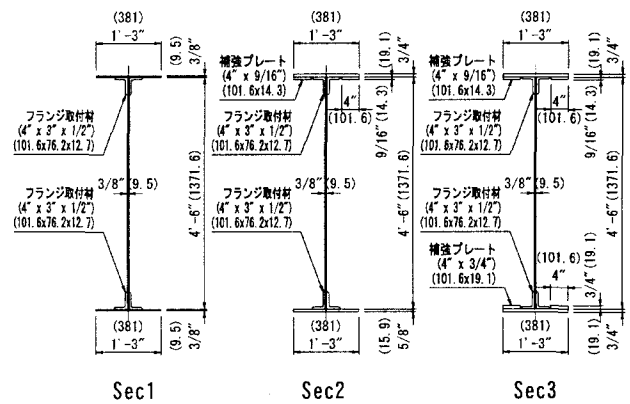


図-6 明治橋の主桁断面 (推定板厚)

表-4 主桁断面性能

	Sec1	Sec2	Sec3
断面二次モーメント (cm ⁴)	907100	1317967	1576032
上フランジ断面定数 (cm ³)	13046.2	20926.8	21883.3
下フランジ断面定数 (cm ³)	13046.2	16966.6	22854.3

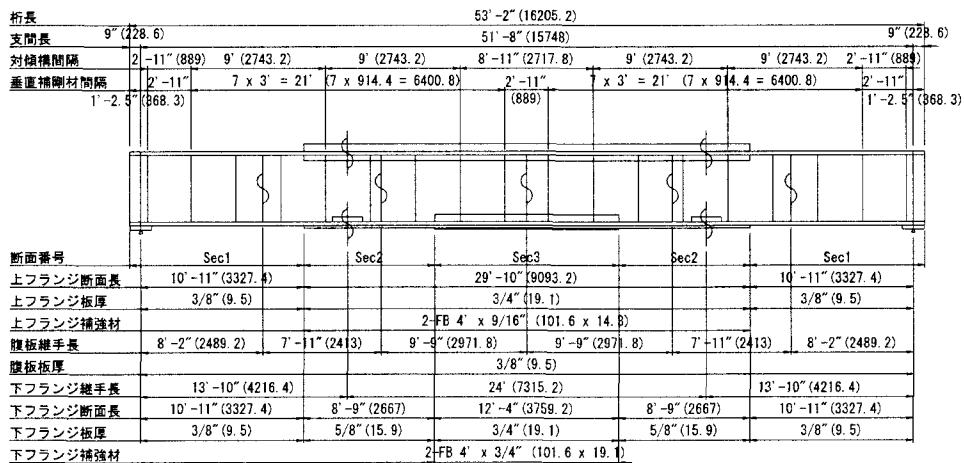


図-7 明治橋の主桁断面構成

明治橋の主桁に作用する応力度を求めるために、図-8に示す荷重を載荷して、主桁の構造解析と断面計算を行うと表-5の結果を得る。活荷重は床版の設計より等分布荷重 4.80kN/m²を用いた。文献4)によると、当時の英国における鉄鋼材の許容応力度としては、鋼(steel)に対して 7.0tf/inch²(106.3N/mm²)、鉄(iron)に対して 5.0tf/inch²(76.0N/mm²)が使用されている。明治橋の主桁材料は、強度・成分調査³⁾から鋼であることが判明しているため、断面計算結果 70N/mm²程度は許容応力度に対して余裕が大きい。また、活荷重たわみも非常に小さい。

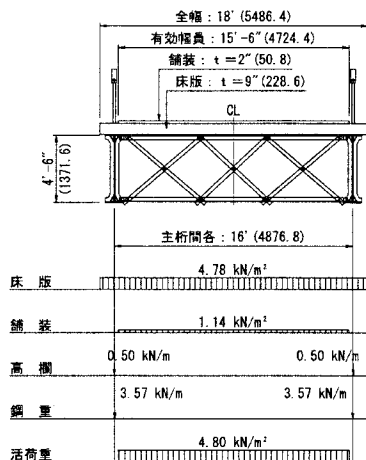


図-8 荷重載荷図

表-5 断面計算結果 (活荷重 : 4.80kN/m²)

	Sec1 支間側	Joint フランジ継手	Sec2 支間側	Sec3 支間中央
断面力 (kN・m)	653.50	768.92	924.72	980.63
上フランジ応力度 (N/mm ²)	-50.1	-44.2	-44.2	-44.8
下フランジ応力度 (N/mm ²)	50.1	45.3	54.5	42.9
下フランジ応力度 (孔引き後) (N/mm ²)	66.8	60.4	72.7	56.8
活荷重たわみ (mm)				1.4

床版を輪荷重(現在のT荷重)で設計した場合に、主桁の設計活荷重は主桁支間長に応じて床版の設計活荷重を割増して使用することが文献4)に書かれている。割増率は明治橋の主桁支間では25%となる。輪荷重と等分布荷重では荷重作用が異なるが、図-8の活荷重を25%割増した計算結果を表-6に示す。主桁に作用する応力度は80N/mm²程度まで大きくなるが、許容応力度に対して少し余裕が大きいと考えられる。

表-6 断面計算結果 (活荷重 : 4.80kN/m² × 1.25)

	Sec1 支間側	Joint フランジ継手	Sec2 支間側	Sec3 支間中央
断面力 (kN・m)	712.07	837.83	1007.59	1068.50
上フランジ応力度 (N/mm ²)	-54.6	-48.1	-48.1	-48.8
下フランジ応力度 (N/mm ²)	54.6	49.4	59.4	46.8
下フランジ応力度 (孔引き後) (N/mm ²)	72.7	65.8	79.2	61.9
活荷重たわみ (mm)				1.7

以上の結果から、桁の設計は床版の設計に比べて余裕が大きいことがわかる。

3. 現況における応力度照査

明治橋は、隣接して新明治橋が建設される1961年までは国道10号線として供用されていたが、その後は歩道橋として使用され、現在に至っている。今後も歩道橋として供用を継続する上で、応力学的な問題を中心とした検討を行う。

3.1 床版の照査

荷重の大きさや載荷方法は、現行の「道路橋示方書・同解説(2002.3)」に従って照査を行う。床版の形状や死荷重は建設時と同様と考え、活荷重は歩道橋として供用することから群集荷重(5.0kN/m²)を使用する。床版コンクリートの合成効果は考慮せず、トラフ形鋼のみで荷重に抵抗するものとする。これらの条件による床版の断面計算結果を表-7に示す。

表-7 床版応力度 (活荷重 : 群集荷重)

	厚さ (mm)	単位重量 (kN/m ³)	単位荷重強度 (kN/m ²)	断面力 (kN・m/m)	トラフ応力度 (N/mm ²)
床版	228.6	20.9	4.78	14.21	43.15
舗装	50.8	22.5	1.14	3.39	10.29
活荷重			5.00	14.87	45.15
合計				32.47	98.59

トラフ形鋼の発生応力度は98.6N/mm²であり、応力度照査に用いるトラフ形鋼の許容応力度を140N/mm²とすると、腐食による多少の板厚減少(構造・損傷度調査¹⁾によると、3/8"(9.5mm)の板厚が8.0mmになっている。)を考慮しても十分許容値内に収まる。この許容応力度は、明治橋建設当時の英国における鋼(steel)の引張強さには32tf/inch²(486N/mm²)、降伏点には16tf/inch²(243N/mm²)が使用されており、現在のSS400と同等であると考えた。

明治橋は1961年まで国道10号線として供用されていた。前述したように、輪荷重をトラフ形鋼のみで支えたと考えると、トラフ形鋼に生じる応力度は過大な値となる。しかしながら、現在の明治橋は、トラフ形鋼が大きく変形(陥没)した箇所がある反面、健全な部分も多い。そこで、当時の「鋼道路橋設計示方書・鋼道路橋製作示方書解説(1956)」に従い、輪荷重(T-20)を使用した照査を試みる。ここでは、トラフ形鋼とコンクリートの合成効果を考え、活荷重に対しては合成断面で抵抗する。同示方書には床版を1方向版として考えた場合の活荷重設計曲げモーメント式が与えられているため、活荷重断面力は下式を使用する。

$$M = \frac{0.5 \cdot P \cdot (L - 1)}{L + 0.4} \times (i + 1)$$

$$i : \text{衝撃係数} \quad i = \frac{20}{50 + L}$$

L : 床版支間長

P : 1輪あたりの荷重

合成効果を考慮した床版の断面性能を表-8に、こ

これらの条件を使用した断面計算結果を表-9に示す。トラフ形鋼とコンクリートの合成効果を考慮すると、床版の断面性能は飛躍的に向上する。トラフ形鋼の引張応力度は77.6N/mm²、コンクリートの圧縮応力度は5.2N/mm²であり、トラフ形鋼とコンクリートのずれが生じない場合は、輪荷重(T-20)に抵抗できる断面性能を有していることになる。

表-8 トラフ形鋼床版の断面性能(非合成)

		1組あたり	1.0mあたり
		(/12")	(/m)
合成前	断面二次モーメント (cm ⁴)	510	1673
	トラフ形鋼断面定数 (cm ²)	100.4	329.3
合成後	断面二次モーメント (cm ⁴)	3593	11788
	コンクリート断面定数 (cm ²)	2311.2	7582.7
		494.3	1622.0

表-9 床版応力度(活荷重:T-20荷重)

	厚さ (mm)	単位重量 (kN/m ³)	単位荷重強度 (kN/m ²)	断面力 (kN・m/m)	トラフ応力度 (N/mm ²)	コンクリート応力度 (N/mm ²)
床版	228.6	20.9	4.78	14.21	43.15	—
舗装	50.8	22.5	1.14	3.39	10.29	—
活荷重	78.4 kN (1輪あたり)			39.28	24.20	5.18
合計				56.88	77.64	5.18

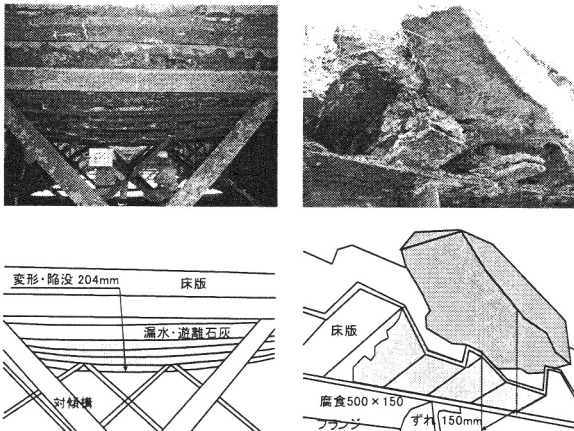


写真-1 床版の損傷状況

現在の明治橋の床版は、損傷がなく健全な部分と、写真-1のようにトラフ形鋼が大きく変形(床版が陥没)してコンクリートがずれている部分に分けられる。損傷した部分の床版は、変形や腐食の進行という問題はあるものの、応力度のみで判断すると群集荷重(5.0kN/m²)に対する耐力を有していると考えられる。

3.2 桁の照査

主桁についても、現行の基準に従った照査を行う。死荷重は建設時と同様と考え、活荷重は歩道橋として供用することから群集荷重(3.5kN/m²)を使用する。床版の合成効果は考慮せず、非合成桁として照査する。主桁断面は腐食等により板厚が減少しているため、図-9に示す実測した板厚を使用する。これらの条件による主桁の断面計算結果を表-10に示す。

全体的な板厚の減少を考慮した場合の主桁応力度は最大75.9N/mm²であり、応力度照査に用いる鋼材の許容応力度140N/mm²と比較して十分な余力を有している。しかしながら、主桁断面は鋼材の腐食が進み、局部的に観ると写真-2のように比較的大きな断面欠損を生じている箇所が多い。フランジ幅に対する断面欠損の割合は、大きく見積って30%程度である。この断面欠損を考慮した応力度は、単純に断面積比で計算すると表-11に示す値となる。この結果は、許容応力度140N/mm²と比較して75%程度に収まっており、仮に応力集中等の影響で2倍程度の応力度が発生しても降伏点235N/mm²には達しない。

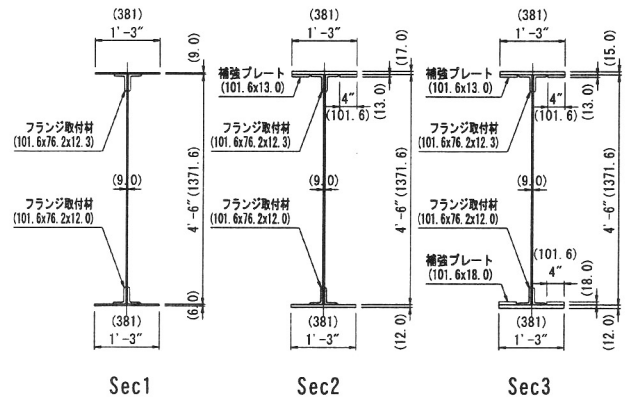


図-9 明治橋の主桁断面(実測板厚)

表-10 断面計算結果(活荷重:群集荷重,実測板厚)

	Sec1	Joint	Sec2	Sec3
断面力 (kN・m)	590.04	694.26	834.95	885.43
上フランジ応力度 (N/mm ²)	-48.3	-42.8	-43.8	-46.6
下フランジ応力度 (N/mm ²)	53.0	47.4	57.0	47.1
下フランジ応力度(孔引き後) (N/mm ²)	70.7	63.1	75.9	62.2
活荷重たわみ (mm)				2.8

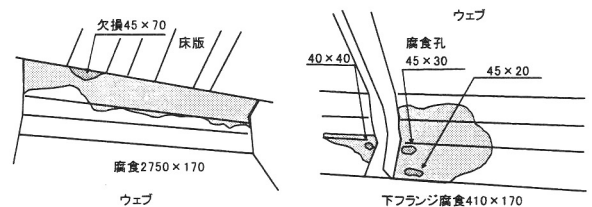
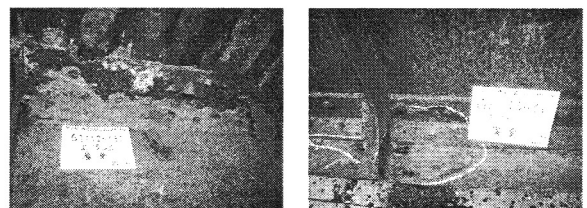


写真-2 主桁断面の損傷状況

表-11 断面計算結果(活荷重:群集荷重,欠損考慮)

	Sec1	Sec2	Sec3
	支間側	支間側	支間中央
上フランジ応力度 (N/mm ²)	-69.0	-62.6	-66.6
下フランジ応力度 (N/mm ²)	101.0	108.4	88.9

3. 3 載荷試験とFEM解析との比較

構造・損傷度調査では、写真-3のように散水車を使用した静的載荷試験²⁾を行っている。載荷試験で得られたひずみや変位をFEM解析値と比較して、明治橋の構造特性を検証する。FEM解析モデルは、図-10に示すように対称性から橋軸に対して1/2モデルとし、床版コンクリートにソリッド要素、トラフ形鋼と主桁にシェル要素、対傾構にロッド要素を使用している。また、床版と主桁の接合部はリベットをバネとしてモデル化し、非合成桁としての解析では微少なバネ値、合成桁としての解析では剛なバネ値を設定した。

比較の1例として、図-11に支間中央における主桁のひずみを示す。①載荷試験による主桁のひずみ分布(実測値)は、②非合成桁としての解析値の中間的な値となり、不完全ではあるが合成桁的な挙動を示していることが判る。したがって、非合成桁として設計した場合は、若干の余剰耐力を有していると考えられる。

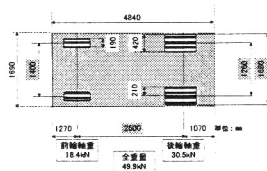
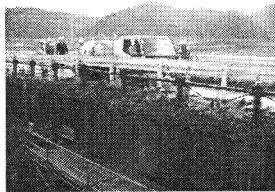


写真-3 載荷試験状況

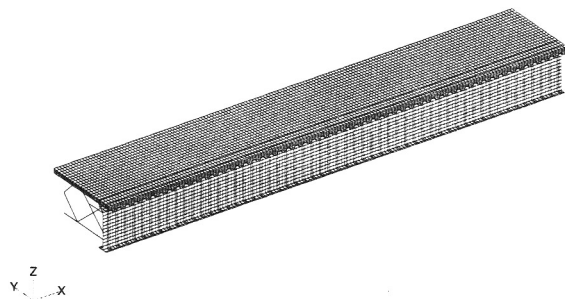


図-10 FEM解析モデル

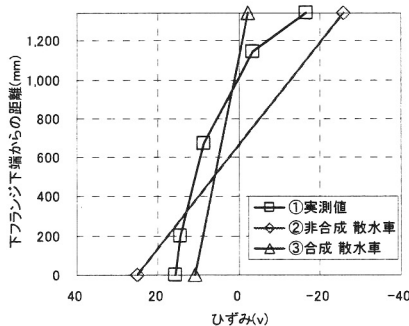


図-11 載荷試験の実測ひずみとFEM解析値の比較

4. 補強・補修の必要性

上部工に関しては、床版と主桁に分けて論じる。床

版はトラフ形鋼が大きく変形し、コンクリートに有害なひび割れが生じている部分がある。かろうじて群集荷重に対する耐力は有しているが、変形や腐食の進行を防止する観点から、コンクリートの部分打ち替えと湾曲したトラフ形鋼の矯正(取替)が必要である。主桁は橋梁全体として考えると、歩道橋としての耐力が十分に残っており補強の必要はない。腐食による部分的な主桁の断面欠損については、照査結果から応力度的な問題はなく、Jスティフナー等を含めて取替の必要はない。ただし、今以上の腐食の進行を防止するために、塗替え塗装等の防錆措置を行う必要がある。

橋面工としては、舗装、防水層、高欄が考えられる。舗装は不陸の調整や排水勾配確保のために、3~5cm程度のアスファルト舗装等が必要である。また、遊間部分からの雨水や土砂の流入により支承まわりの損傷が懸念されるため、非排水構造の伸縮装置を設置することが望ましい。同時に床版内への水の侵入を防止するために、防水層の設置が望まれる。高欄は建設当時のものが残っており、形状に特徴があるため、損傷部材の取替等で現状の高欄を極力残す修復的な補修が良いと考えられる。

石積みの下部工については、橋台と橋脚ともに風化やひび割れ等の損傷はなく、基礎部の洗掘も発生していないため、補強・補修の必要はない。

5. おわりに

ここまで明治橋の供用継続に対し、文化財的な価値を念頭に置いた補修方法について、構造設計的な観点からその必要性を述べた。対傾構や支承の取り扱い、施工方法や経済性等の検討課題も残されているが、歴史的価値の調査と共に、「土木学会鋼構造委員会道路橋床版の合理化検討小委員会」の明治橋分科会において、平成18年度を目処に活動成果をまとめる予定である。

【参考文献】

- 1) 杉原, 財津, 松井, 堀川: 100年を経た合成床版を有する鋼2主I桁橋(明治橋)の構造・損傷度調査, 第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集, 2004.11, pp29-36
- 2) 山口, 高林, 内田, 日野: 100年を経た合成床版を有する鋼2主I桁橋(明治橋)の静的載荷試験, 第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集, 2004.11, pp37-42
- 3) 杉原, 中村, 中原, 高林, 山尾: 現存する日本最古の鋼桁道路橋, 明治橋の構造・材料調査, 土木史研究概要集, Vol. 25, 2005, pp263-271
- 4) P. O. G. Osborne: The Design of Simple Steel Bridges, Constable & Company Ltd, 1912
- 5) Dorman Long Pocket Companion, 1906