

第Ⅱ編 健全度評価と補修・補強方法

第 編 健全度評価と補修・補強方法

1. 現橋調査

1.1 調査の概要

明治橋は国内最古の合成床版を有する鋼 2 主 I 桁橋であり，明治 35（1902）年に現位置に架設されて以来，平成 20（2008）年現在まで 106 年間，移設されることなく供用を継続している．昭和 36（1961）年までは国道 10 号として供用され，新明治橋開通以後は歩道橋となっている（写真-1.1.1，図-1.1.1 参照）．

明治橋は架設後約 50 年を経過した時期に一度だけ塗装の塗り替えられたことが，近隣住民の記憶から確認されている．現在では架設当時は勿論のこと，塗り替えられた塗装も消失しており，橋梁全体で腐食が進行している状況にある．これまでに，明治橋の実態調査として構造および損傷部状況の簡易的な確認作業を行っており，その結果，明治橋を保存するためにはなんらかの補修・補強対策を施す必要があるとの結論に至った．

そこで，明治橋を保存することを目的として，平成 16（2004）年 3 月に明治橋の詳細な構造・損傷度調査および載荷試験を実施した．

明治橋架設当時の設計図書はすでに残っていないため，構造の図面化が必要であった．今回実施した構造・損傷度調査では，明治橋の構造一般図の復元を行い，同時に各部材の腐食や亀裂といった損傷状態とその範囲の記録を行った．調査範囲は全体 2 径間のうち P1 橋脚 - A2 橋台間の 1 径間を対象とし，対象区間には河床より全面足場を設置し，上部工の詳細調査に加えて，基礎部および下部工の外観調査を行った．床版コンクリートの損

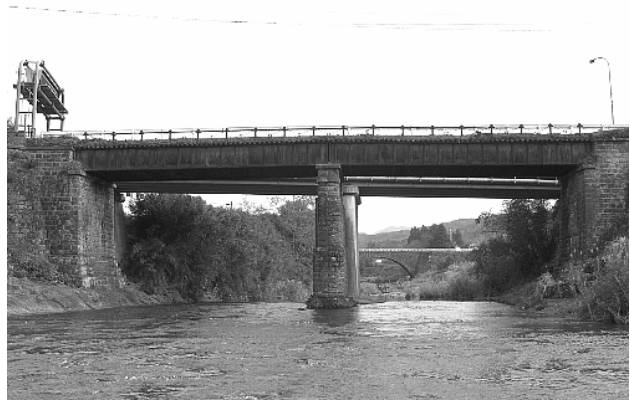


写真-1.1.1 明治橋

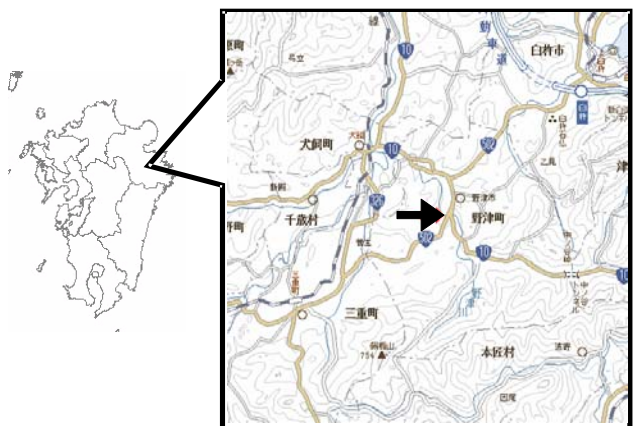


図-1.1.1 明治橋の架設位置

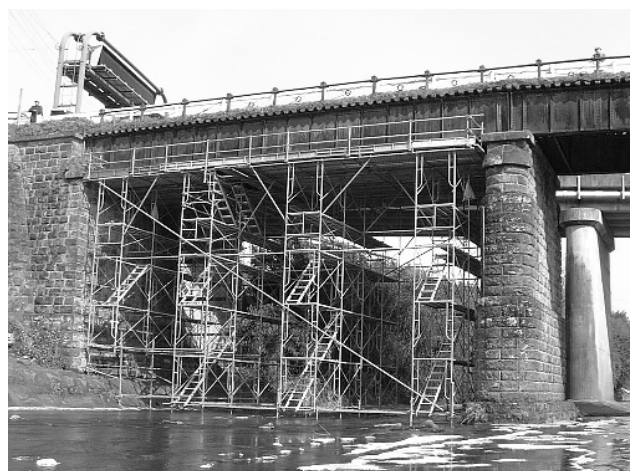


写真-1.1.2 調査実施状況

傷実態を調査するため、事前に床版上面の舗装および土砂を取り除き、コンクリート床版上面を露出させた。調査の状況を写真-1.1.2に示す。また、現地調査を行った結果、鋼桁の腐食、床版のひび割れおよび陥没、対傾構の座屈などの損傷が確認された。

上記の外観調査に加え、損傷を受けた本橋の挙動を把握するため、静的載荷試験を実施した。静的載荷試験では、床版ならびに鋼桁の変形状態を把握することを目的とした。すなわち、当該部材の活荷重によるたわみ、たわみの影響線、ひずみ、橋体温度の測定および材料の強度特性を調べ、損傷部のこれらの性状を把握し、今後の補修補強方法を検討する為の基礎データを得ることとした。

1.2 損傷度調査

1.2.1 損傷状況の概要

損傷度調査結果の概要を図-1.2.1に示す。損傷状況としては、主桁鋼部材の腐食・断面欠損、対傾構・垂直補剛材の亀裂、ボルト脱落、床版コンクリートひび割れ、床版の陥没・変形、および漏水・遊離石灰の析出であった。

明治橋架設後、塗り替え塗装は1度のみであり、腐食が橋梁全体で進行している。特に、

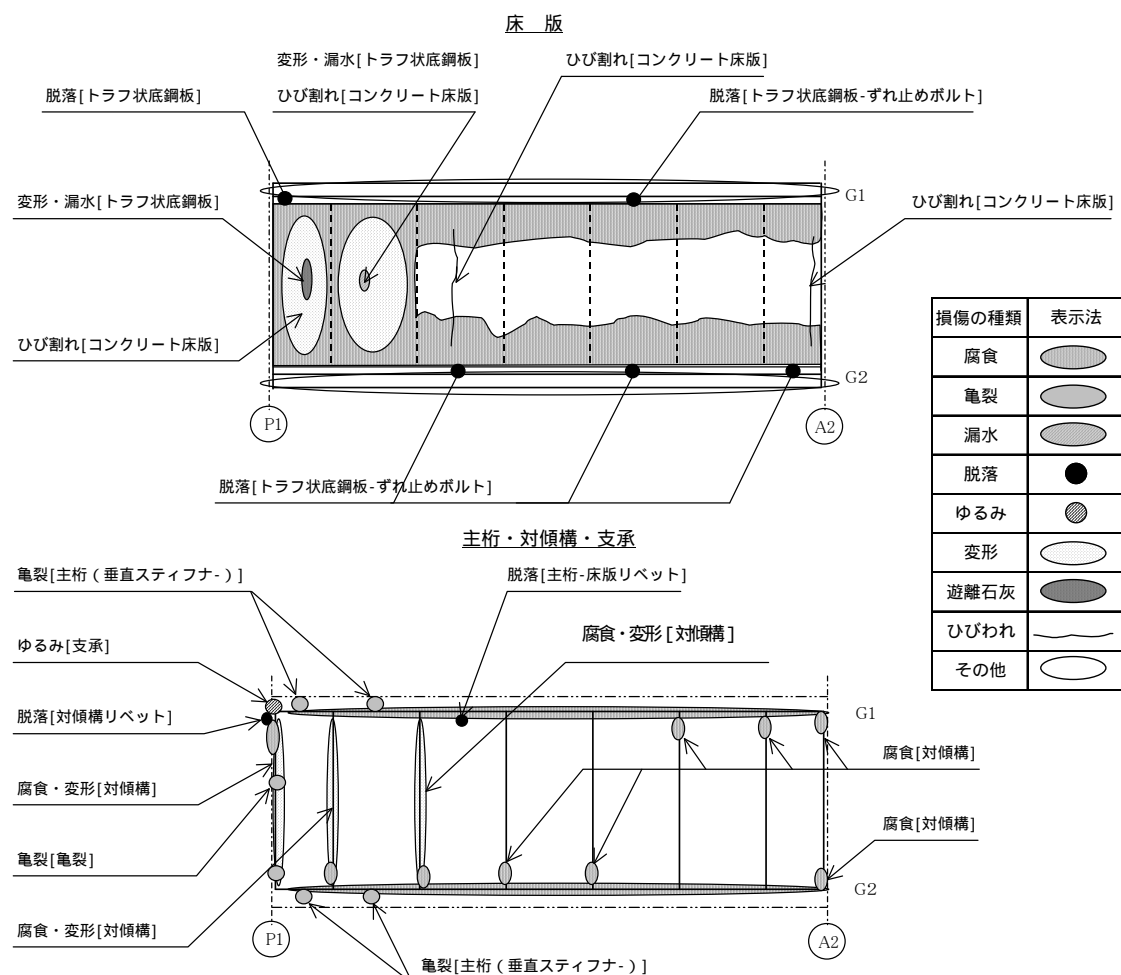


図-1.2.1 損傷状況の概要



写真-1.2.1 床版陥没部状況（上面）



写真-1.2.2 床版陥没部状況（下面）

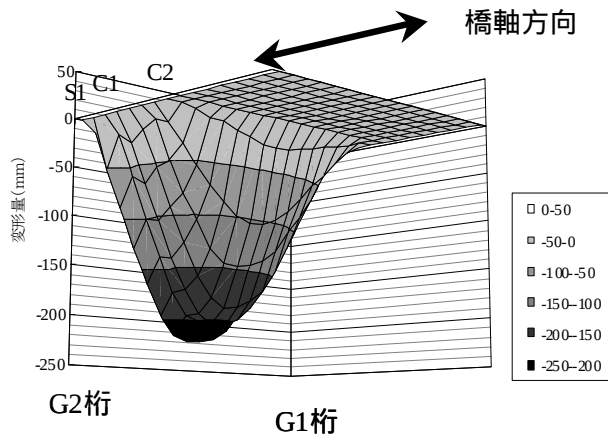


図-1.2.2 床版陥没部の鉛直変形量



写真-1.2.3 床版張出し端部状況

支点部の下フランジおよびウェブ，主桁と床版の連結部周辺の上フランジおよび床版底鋼板で腐食進行が著しい．主桁の上流側・下流側で比較すると，G2桁（上流側）がG1桁（下流側）に比べて腐食が進展していた．

1.2.2 トラフ床版

調査対象範囲であるA2 - P1間においては，写真-1.2.1，1.2.2に示すように，P1橋脚側の床版が陥没している．床版コンクリート上面には亀甲状にひび割れが進展しており，一部コンクリートの圧壊が見られた．床版下面ではトラフ状底鋼板が鉛直下方に大きく変形し，その連結部で漏水・遊離石灰の析出が見られる．

陥没部の鉛直方向変形量の計測結果を図-1.2.2に示す．計測はG1,G2桁それぞれの上フランジ上面高さを基準とし，床版底鋼板下面の相対位置を計測している．計測の結果，最大の鉛直方向変形量は，床版支間中央部で221mmであった．

写真-1.2.3に床版張出し端部のひび割れ状況，写真-1.2.4に床版コンクリートのコア



写真-1.2.4 床版コンクリートコア

試験体の状況を示す。また、写真-1.2.5 にコア抜きした床版内部の状況を示す。床版コンクリートのコア試験体採取箇所としては、図-1.2.3 に示すようにトラフ状底鋼板の谷部とし、床版コンクリートの健全部で5箇所、陥没部で3箇所、計8箇所にて採取した。なお、健全部とは床版コンクリート上面に亀甲状のひび割れが発生していない範囲であり、陥没部とは亀甲状ひび割れが進展した範囲を示す。

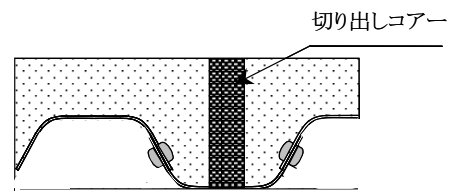


図-1.2.3 床版コア抜き形状



写真-1.2.5 床版コア抜き部状況

床版張出し端部のひび割れ状況より、床版コンクリートがトラフ状底鋼板の上底面高さで水平ひび割れが進展し、上下に分割されている状況が確認できる。採取したコア試験体においても、すべて床版コンクリート下面から約100mmの位置で破断しており、水平ひび割れは床版コンクリート健全部と判断していた範囲においても進展している。床版コンクリート陥没部においては下面側で骨材のみが残った状態となっており、セメント成分の流出と擦りみがき原因と考えられる。

トラフ状底鋼板の下面においては、全体に腐食が進行しているが、特に床版陥没部および床版と主桁の取り合い部で腐食進行が著しい。

床版 - 主桁結合部の腐食状況を写真-1.2.6 および写真-1.2.7 に示す。床版張出し端部からの水の供給により床版 - 桁結合部の腐食が進行し、陥没部においては床版ひび割れ内に浸透した雨水がトラフ状底鋼板の接合部隙間より下面に流出し、腐食を進行させたと考えられる。腐食は底鋼板、主桁上フランジのほか、結合部リベットにおいても著しく、一部リベットの脱落箇所も確認している。



写真-1.2.6 床版-桁結合部（桁外面）



写真-1.2.7 床版-桁結合部（桁内面）



写真-1.2.8 主桁の状況（桁外面）

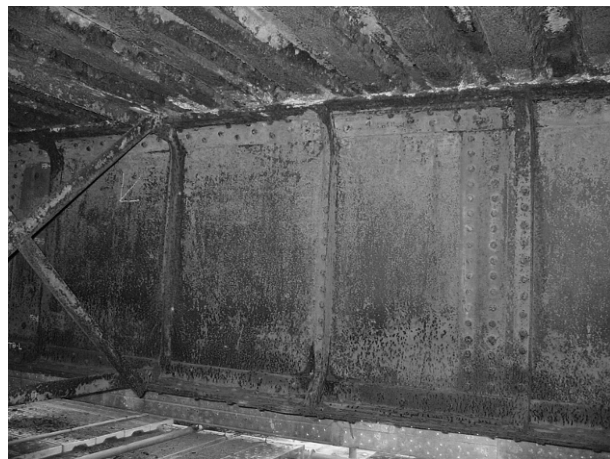


写真-1.2.9 主桁の状況（桁内面）

1.2.3 主桁

主桁全体の腐食状況を写真-1.2.8 および写真-1.2.9 に示す。主桁は全体にわたって腐食が進行している。特に腐食の著しい部材としては、床版と主桁の結合部上フランジ、フランジおよびウェブとアングル材の鋼材接触間、フランジの重ね板間および支点部周辺のウェブと下フランジであった。特に写真-1.2.10 に示すように支点部周辺では下フランジの断面欠損が著しい。写真-1.2.11 に示すように支間部の主桁においては、上フランジで断面欠損している箇所が見られたが、ウェブおよび下フランジにおいてはそれほど腐食が進行していない状態に留まっていた。

支点部においては堆積した土砂が水分の持続的な供給源となり、腐食を促進させていると考えられる。主桁で使用されているリベットについては上フランジで腐食によるリベット頭部の欠損が見られるが、ウェブおよび下フランジではリベット頭部も残っており、損傷程度としては小さい。

主桁内側のウェブでは鋼材表面に塗装もしくは錆び止めが若干残っていた。供用102年を経た鋼材としては、非常に健全であり、鋼橋としては恵まれた環境条件にあったと考えられる。



写真-1.2.10 主桁の状況（支点部）



写真-1.2.11 主桁の状況（支間部）

1.2.4 垂直補剛材

垂直補剛材は J スティフナ - と呼ばれる上下端に彎曲部をもつ補剛材であり、明治期にイギリスで製作された橋梁に多く採用されている補剛材形状である。補剛材断面はアングル形状であり主桁の上下フランジおよびウェブとはリベットにより接合されている。主桁フランジ - ウェブの取り付け用アングル位置では、干渉を避けるため折り曲げ加工がなされている。

垂直補剛材の損傷状況としては、曲線部の亀裂と腐食進行による断面欠損である。写真-1.2.12 に亀裂の発生状況を示す。亀裂の発生した垂直補剛材の設置範囲は、床版陥没部の範囲 S2 - C2 間の 10 箇所であった。亀裂は主桁上フランジ側の垂直補剛材曲線加工部であり、上フランジとウェブを結合するアングル材の板コバ面から発生している。床版陥没によって主桁上フランジの首振り変形が大きくなり、アングル材止端部周辺の局部変形が大きくなったことが原因と考えられる。

垂直補剛材の腐食状況を写真-1.2.13 に示す。補剛材全体に腐食は進行しているが、特に下フランジ側の補剛材彎曲部で腐食による断面欠損が著しい。また、ウェブと補剛材の接合面、アングル材と止端部周囲で局所的な腐食が進行している。



写真-1.2.12 亀裂状況（垂直補剛材）



写真-1.2.13 垂直補剛材の腐食状況

1.2.5 対傾構

対傾構は上下弦材にアングル、斜材に平鋼を使用し、リベットにより接合した構造である。主桁とは上下弦材と桁上下フランジをリベットにより固定している。

写真-1.2.14 に対傾構変形状況を示す。床版が陥没している範囲で対傾構上弦材より直接荷重を受けた結果、対傾構上弦材の変形および斜材の座屈変形が発生している。今回の調査範囲においては P1 橋脚上端対傾構(S1)および中間対傾構(C1,C2)で変形が見られたが、隣接径間である A1 橋台 - P1 橋脚間においてはさらに広い範囲で同様の変形が生じている。

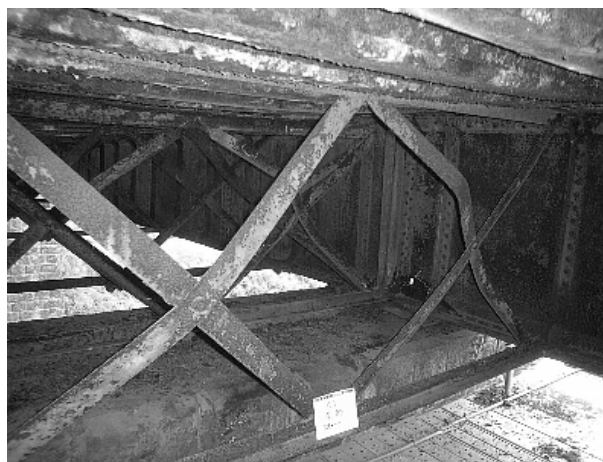


写真-1.2.14 対傾構変形状況(P1 橋脚側)

この他対傾構の損傷としては，端対傾構において腐食による断面欠損および局部変形位置の亀裂発生を確認している．

1.2.6 支承

写真-1.2.15 に A2 橋台部の支承状況を示す．A2 橋台部，P1 橋脚部の支点とも下部工天端に設置したベースプレート上に直接もしくはフィラープレートを挿入して主桁を載せただけの構造である．ベースプレートと下部工コンクリートとはアンカーボルトによって固定されている．

調査時には支承周りは土砂に覆われており，腐食の進行が懸念されたが，ベースプレートそのものは若干の錆が見られる程度であり，ほぼ健全であると言える．固定用のナットは頭部が腐食により残っていない箇所が見られた．



写真-1.2.15 支承(A2 橋台側)

1.2.7 高欄および下部工

高欄は写真-1.2.16 に示すように高さ約 1.0m であり，橋面からの高さとしては 50cm 程度しかないため，現在は車道用ガードレールが内側に設置されており，旧来の高欄は景観用となっている．親柱は橋面上には 1 本も残っていないが，本調査時に河川の中より発見されている（写真-1.2.17 参照）．

高欄の損傷としては，腐食と一部斜材の破断であった．

橋台および橋脚の外観状況を写真-1.2.18 に示す．下部工は石造であり，外観調査からは変状はなかった．また，基礎が堅固な岩盤上にあり，洗掘による変状は発生していないことから，下部工および基礎はいまなお健全であることが伺える．



写真-1.2.16 高欄損傷状況



写真-1.2.17 高欄親柱



写真-1.2.18 下部工

1.3 載荷試験

1.3.1 試験概要

(1) 調査対象区間

静的載荷試験の対象範囲として、全体 2 径間のうち大分市側となる P1 橋脚 - A2 橋台間の 1 径間とした。該当区間には、河床より全面足場を設置した。

橋梁外観および静的載荷試験状況を写真-1.3.1 に示す。



写真-1.3.1 橋梁外観および静的載荷試験状況

(2) 計測項目および位置

計測項目は、床版コンクリート・トラフ状底鋼板・桁のたわみ、ひずみ、床版 - トラフ状底鋼板 - 桁の水平ずれ、床版コンクリートのひび割れ幅の増加量、橋体の温度である。計測項目を表-1.3.1 に示す。

計測位置は、図-1.3.1 に示すように、主として調査対象区間の 3 断面で、断面 A は床版の損傷が大きい箇所、断面 B はスパン中央、断面 C は床版が比較的健全な箇所である。桁のたわみは、G1 および G2 桁の 3 断面+桁両端とした。床版のたわみは、各断面において床版支間方向にさらに 3 断面を計測した。ここで G1 は上流側の桁、G2 は下流側の桁であ

り，本報告書の他の部分とは定義が異なっているので注意されたい．

桁のひずみは，G1 桁の断面 A，B の上フランジ下面，ウェブ（3 箇所），下フランジ上面を計測した．床版のひずみは，断面 A，B の床版支間方向に 2 箇所（1/4 断面，中央断面）を計測した．

床版コンクリート上面のひび割れ幅の増加量は，図-1.3.1（c）の MB-1，MB-2 に 3 方向クラックゲージを設置して計測した．温度は，G1 および G2 桁の断面 B の上下フランジを計測した．

表-1.3.1 計測項目および使用センサー

	測定部材	断面	センサーの種類と感度方向
変位	主桁	A	ひずみ型変位計（鉛直）
		B	
		C	
	桁端	A2	ひずみ型変位計（鉛直）
		P1	
	床版	A	ひずみ型変位計（鉛直）
		B	
C			
D			
ひずみ	主桁上フランジ	A	1 軸ひずみゲージ（橋軸）
		B	
	主桁下フランジ	A	1 軸ひずみゲージ（橋軸）
		B	
	主桁ウェブ	A	3 軸ひずみゲージ（基：橋軸）
		B	
	トラフ状底鋼板	A	2 軸ひずみゲージ（橋軸，橋軸直角）
		B	
		D	
	床版コンクリート表面	A	1 軸ゲージ×2 方向（橋軸，橋軸直角）
B×2			
対傾構	B	1 軸ひずみゲージ（軸力）	
高欄	B	1 軸ひずみゲージ（軸力）	
相対ずれ	床版下面	B	π ゲージ（橋軸）
	主桁 - 床版間	-	ひずみ型変位計（橋軸）
		-	
ひび割れ	床版表面	-	m ゲージ（ひび割れ直角）
		-	π ゲージ（ひび割れ直角）
温度	主桁上フランジ	B	簡易接触型温度計
	主桁下フランジ		

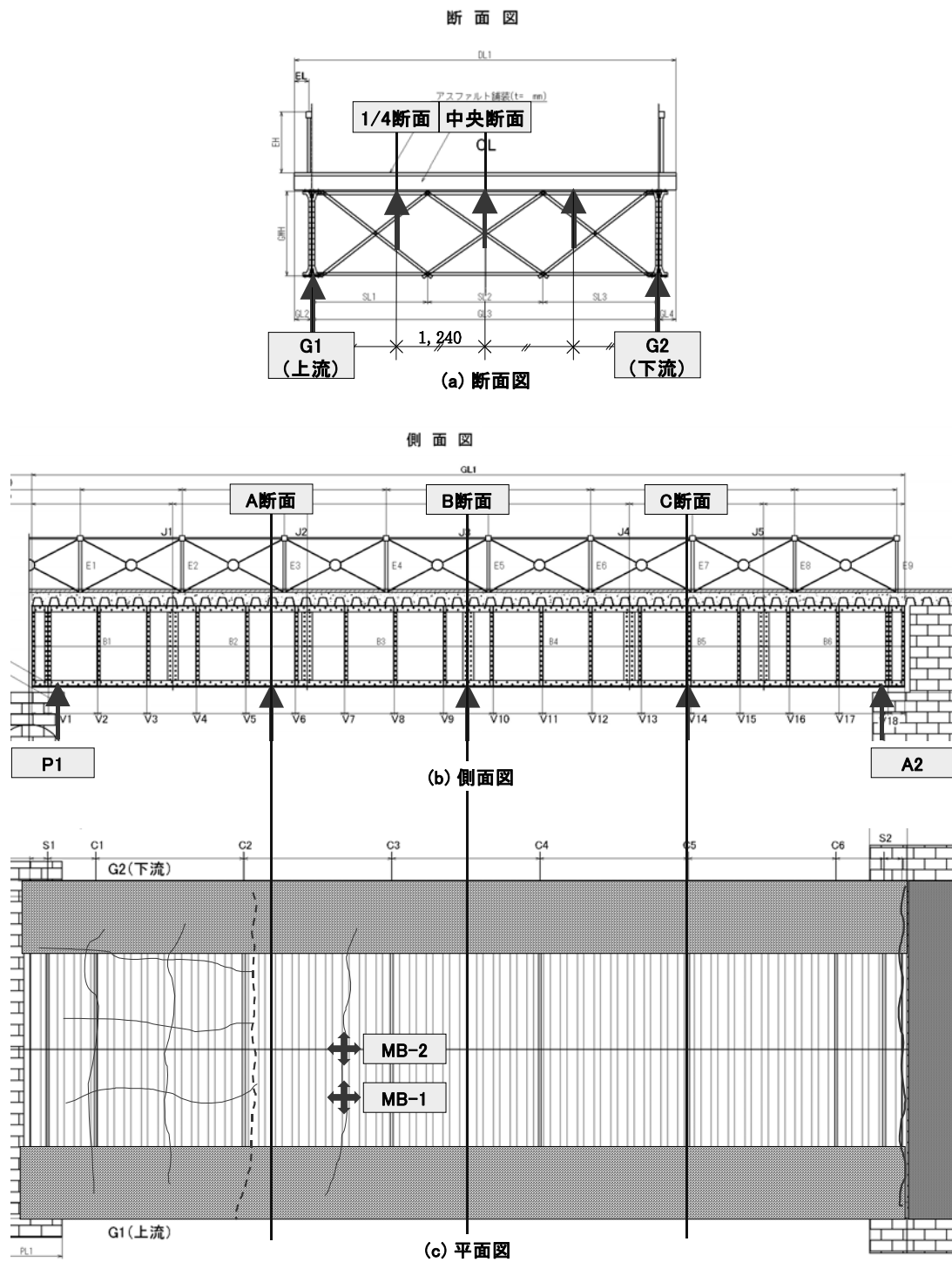


図-1.3.1 計測位置

(3) 載荷パターンおよび載荷車両諸元

載荷は、総重量 50kN の散水車を用いて、図-1.3.2 に示すように以下の要領で実施した。
 なお、幅員が狭く載荷車が一台しか配置できない為、幅員中央に載荷することとした。

(パターン 1: 各断面のたわみ、ひずみ性状に着目)

「前 0 点」→「断面 C」→「断面 B」→「断面 A」→「後 0 点」を 4 回繰り返し、走行毎に 2 回計測 (計 8 回の計測) した。

(パターン 2: たわみの影響線に着目)

「A2」→「 」→・・・→「 」→「P1」を 2 回繰り返し、その後「P1」→「 」→・・・→「 」→「A2」を 2 回繰り返した。

計測時刻は、パターン 1 は 9:20～11:34、パターン 2 は 11:45～12:30 および 16:30～17:15 であった。載荷車両は散水車で、図-1.3.3 に示すように全重量 48.9kN、後輪軸重 30.5kN、前輪軸重 18.4kN である。

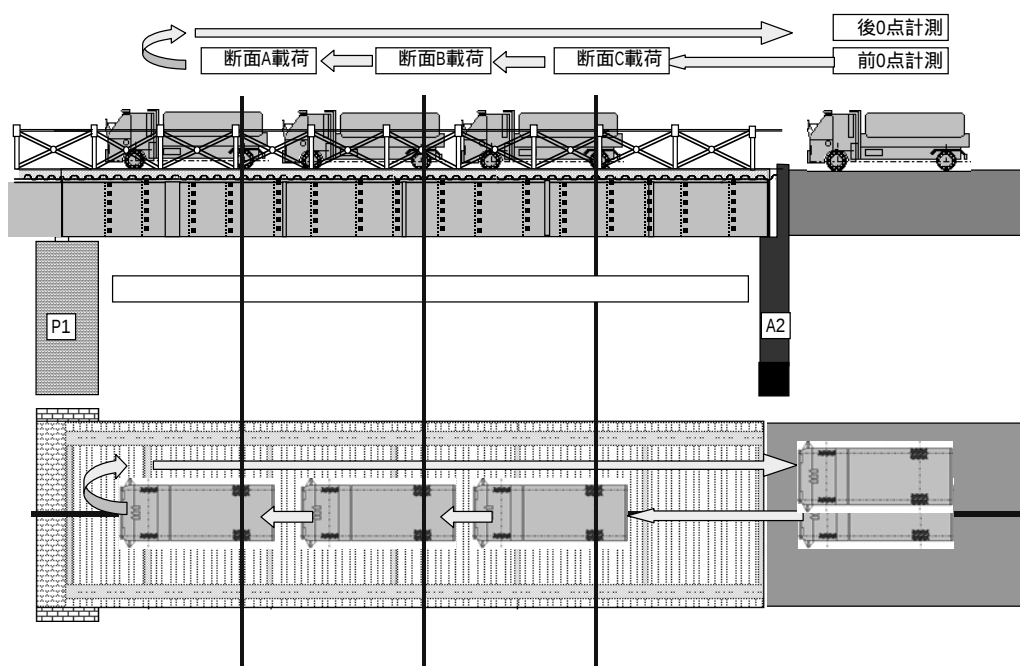


図-1.3.2 載荷パターン

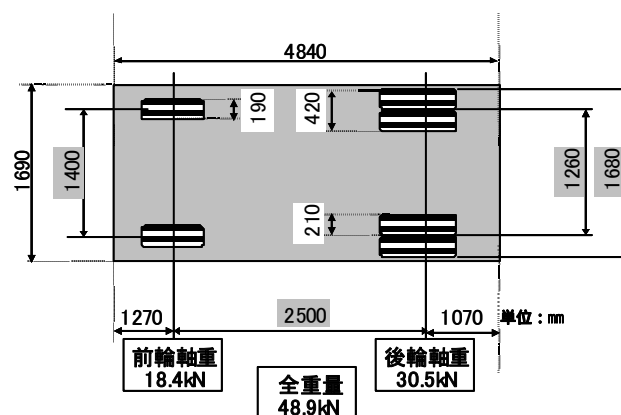


図-1.3.3 載荷車両諸元

(4) 橋体温度

載荷試験と平行して、橋体温度を計測した。計測箇所は、G1 および G2 桁の断面 B の上下フランジである。結果を図-1.3.4 に示す。

同図より、午前は東側の G1 桁の温度が高いが、午後から夕方にかけては、西側の G2 桁の温度が高いことがわかる。終日にわたり直射を受ける下フランジの温度が高いことがわかった。また、外気温度と橋体温度は、あまり差がないことがわかる。

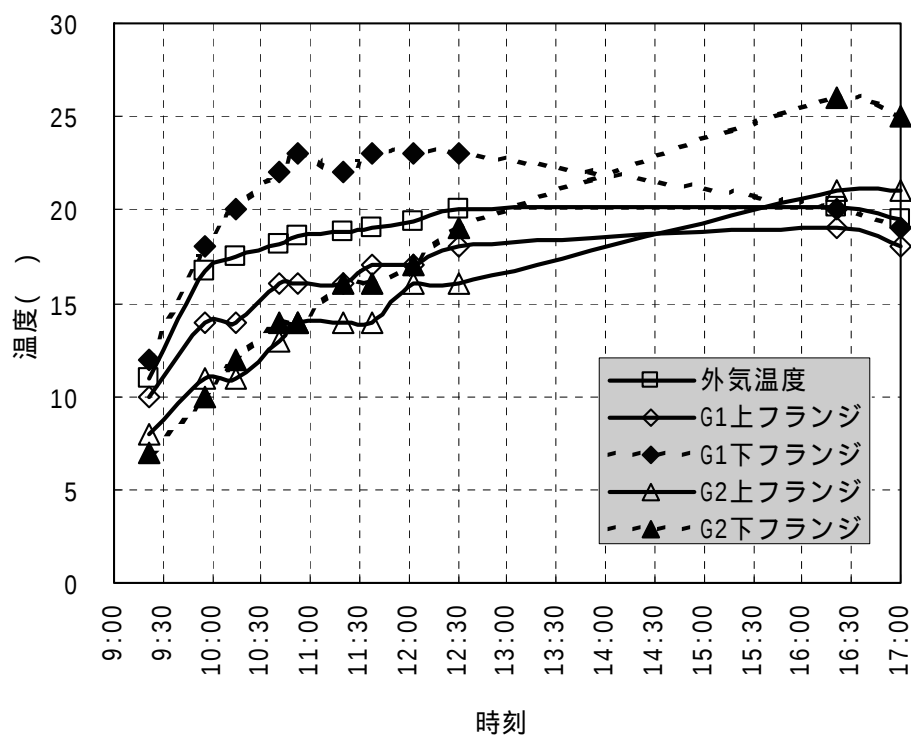


図-1.3.4 橋体温度

(5) 床版コンクリートおよび鋼材の強度特性

床版コンクリートをコア抜きし、圧縮強度試験を実施した。また、対傾構斜材を一部採取して、鋼材の引張強度試験を実施した。その結果を表-1.3.2 に示す。

表-1.3.2 強度試験結果

(a) 床版コンクリート

供試体	圧縮強度 (N/mm^2)		ヤング率 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)	
1	18.7	19.0	1.11	1.14
2	18.9		1.44	
3	18.6		1.43	
4	19.7		0.56	
5	25.4	24.9	1.61	1.59
6	24.8		1.68	
8	24.6		1.48	

(b) 鋼材

上降伏点 (N/mm^2)	下降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	伸び (%)
299	296	430	31

1.3.2 結果および考察（パターン 1）

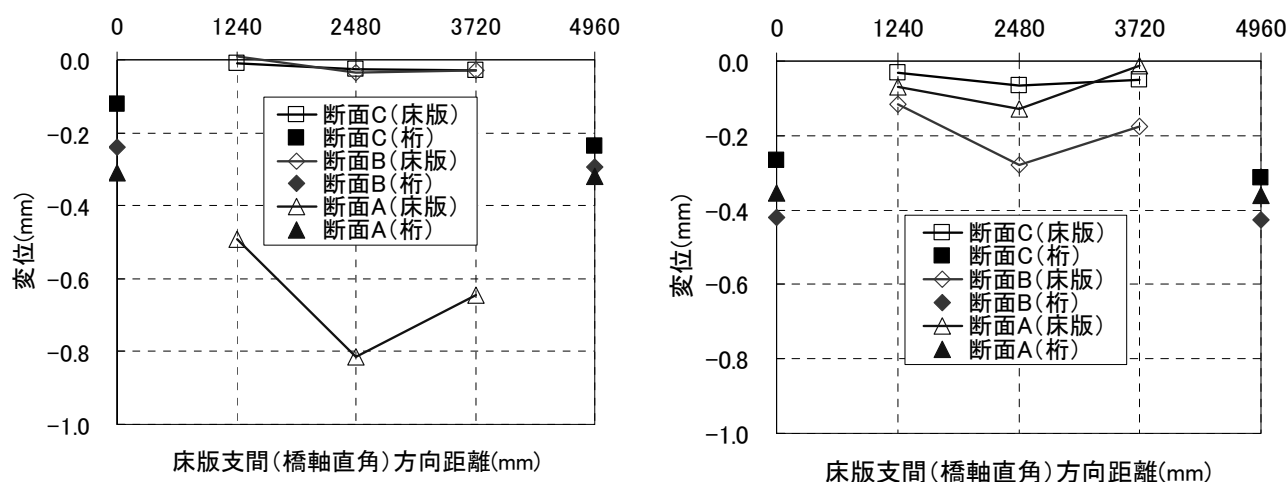
(1) 床版作用

a) たわみ性状

図-1.3.5 に断面 A, B 載荷時の床版の桁に対する相対たわみ分布を示す．横軸は，床版支間距離（G1:0，G2:4960）を示す．

同図より，作用曲げモーメントが最大となるスパン中央載荷（断面 B 載荷）時よりも，断面 A 載荷時の方が，たわみ量が多いことがわかる．これは構造損傷度調査から，断面 B, C の床版は比較的健全であったが，断面 A 近傍はトラフ状底鋼板自体が下方方向に陥没していること，さらに床版コンクリート上面に，亀甲状のひび割れが集中していることが明らかにされている．よって，床版の損傷が著しい断面 A 載荷時のたわみ量が，著しく大きかったと考えられる．

床版支間方向の変形形状は，床版支間中央に対してほぼ対称となっており，床版の損傷の偏りおよび床版と桁の合成度の違いはないものと推測される．



(a) 断面 A 載荷時

(b) 断面 B 載荷時

図-1.3.5 床版のたわみ分布

b) ひずみ性状

図-1.3.6 に断面 A 載荷時の床版上下面の床版支間（橋軸直角）方向ひずみ分布を示す．横軸は床版支間距離の 1/2（G1:0，床版支間中央:2480）である．また，トラフ状底鋼板であるため，床版は厚い断面，薄い断面があるが，同図は，厚い断面の値である．薄い断面には，ひずみはほとんど発生しなかった．

同図より，ひずみの最大値は約 40 μ であること，また断面 B はほとんどひずみが発生していないことがわかる．

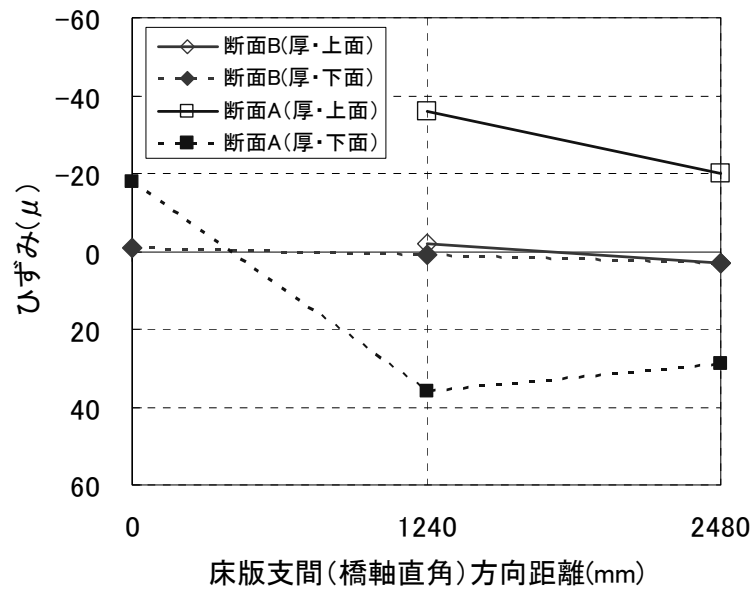


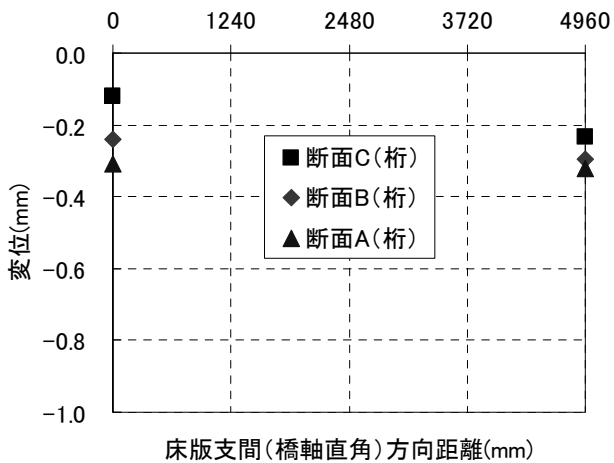
図-1.3.6 床版支間（橋軸直角）方向ひずみ分布（断面 A 載荷時）

(2) 桁作用

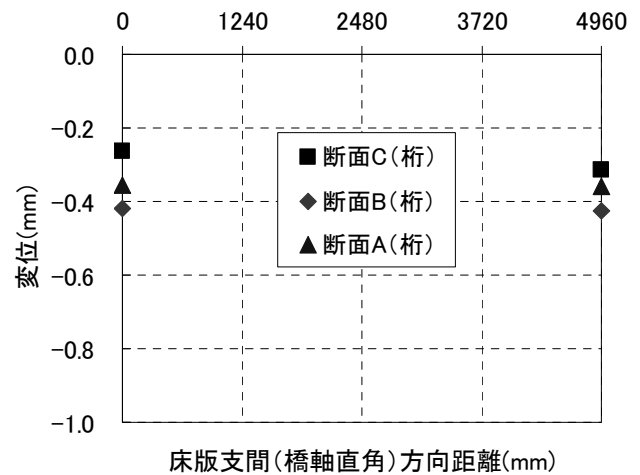
a) たわみ性状

図-1.3.7 の断面 A, B 載荷時の桁のたわみ分布を考察する．なお，横軸の 0 は G1 桁，4960 は G2 桁位置を示す．

同図(b)より，断面 B 載荷時の断面 A と断面 C のたわみ量は，断面 A の方が大きいことがわかる．これからも断面 A 近傍が痛んでいることがわかる．また，G1, G2 ともたわみはほぼ同値で，損傷の偏りはないものと推測される．



(a) 断面 A 載荷時



(b) 断面 B 載荷時

図-1.3.7 桁のたわみ分布

b) ひずみ性状

図-1.3.8 に断面 A, B 載荷時の床版および桁の橋軸方向ひずみ分布を示す．縦軸は下フランジ下端からの距離（下フランジ下端:0, 上フランジ上端:1340）である．なお，床版のひずみは，G1 側（図-2.1.1 (a) 中の 1/4 断面）のみ計測した．

同図 (a), (b) より，断面 A の上フランジのひずみは G1 の方が若干大きい，総じて G1 と G2 に差はないものと思われる．

また，断面 B 載荷時の断面 B のひずみ量（上フランジ約 -20μ ）と断面 A 載荷時の断面 A のひずみ量（同約 -40μ ）を比較すると，後者の方が明らかにひずみが大きいことがわかる．

さらに，同図 (a) より，トラフ状底鋼板と上フランジのひずみの不連続は，床版と桁の不完全合成度を意味し，また，中立軸位置は断面 B の方が床版（上）側にあることがわかる．これは，断面 A の床版損傷度が大きいことを示唆するものである．

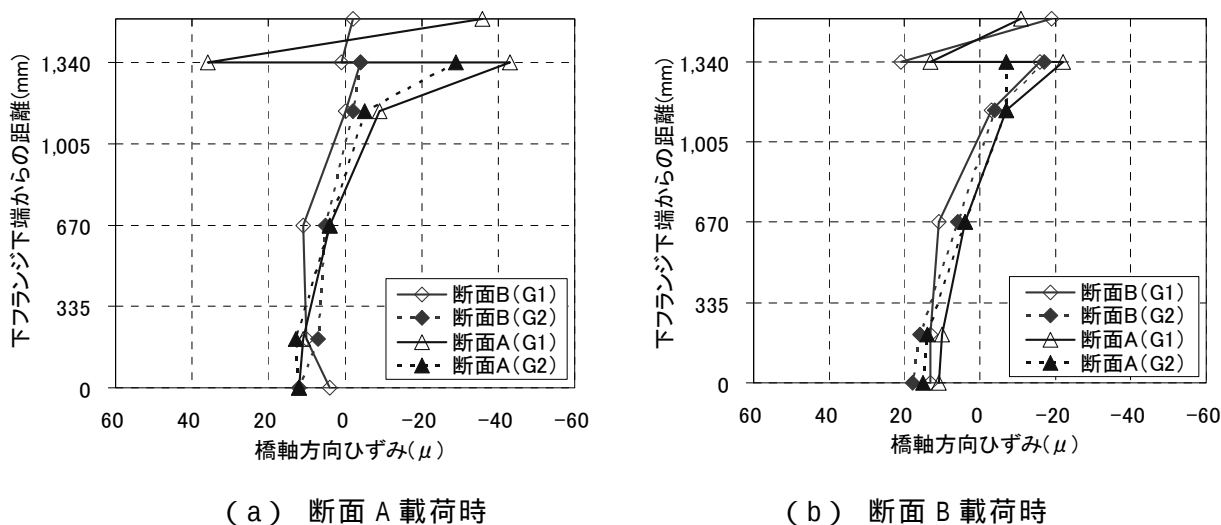


図-1.3.8 床版および桁の橋軸方向ひずみ分布

1.3.3 結果および考察（パターン 2）

(1) 床版のたわみの影響線

図-1.3.9 に床版のたわみ（床版支間中央位置）の影響線を示す．なお，横軸は，橋軸方向距離（A2:0, P1:16250）を示す．

断面 A, C は，スパン中央に対して対称となっておらず，断面 A の方が変位量は著しく大きいことがわかる．同図には示していないが，床版の陥没が最も大きかった断面 D（断面 A と P1 の間）のたわみ量は，断面 A の約 3 倍であることがわかった．

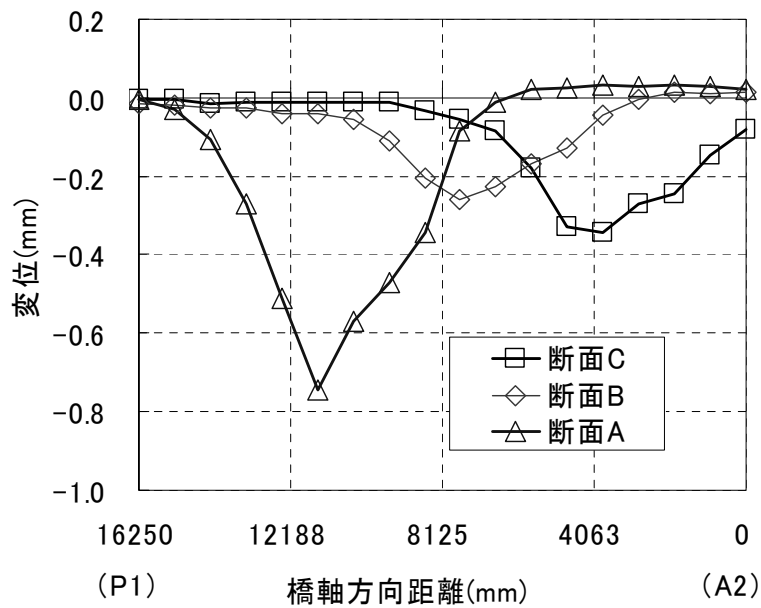


図-1.3.9 床版のたわみの影響線

(2) 桁のたわみの影響線

図-1.3.10 に桁のたわみの影響線を示す．横軸は，橋軸方向距離（A2:0，P1:16250）を示す．

同図は，A2→P1へ走行した結果であるが，載荷車両が走行し終えたP1位置にある時に，断面A，B，CのG1のたわみ量は0ではなく，桁のたわみが残留し，上方向に反り上がっていることがわかる．P1→A2へ走行した場合にも，載荷車両が走行し終えたA2位置にある時に，G2のたわみ量は0ではなく，同様の現象が見られた．これは，載荷車両の偏心などの影響によるものと考えられる．

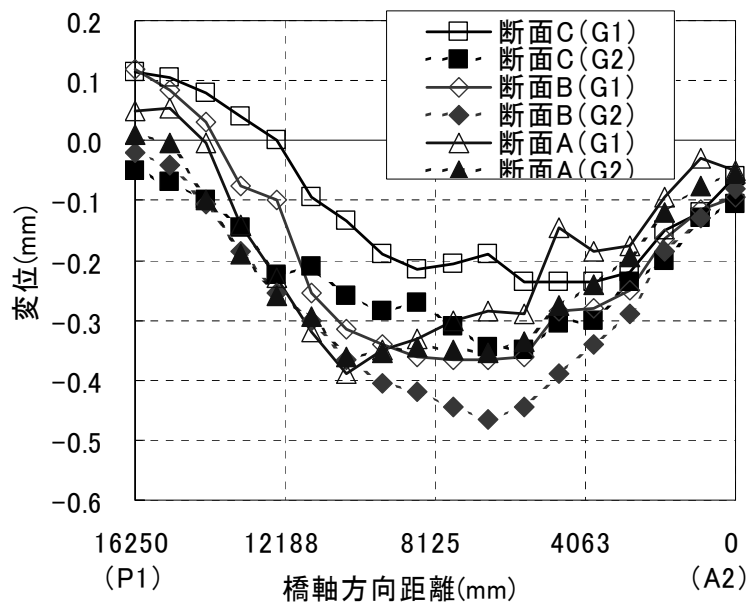


図-1.3.10 桁のたわみの影響線

1.4 まとめ

本章で得られた結果を以下にまとめる．

損傷度調査により明治橋の腐食進展度を確認した．腐食の進行が著しい部位としては，支点部周辺の下フランジおよびウェブ，床版と主桁の接合部，床版陥没部底鋼板である．

橋軸方向の床版たわみ形状は，スパン中央載荷時において対称ではなく，最も損傷が著しい断面 A 載荷時に最大たわみとなる．

床版支間方向の床版たわみ形状は，床版支間中央に対してほぼ対称である．

トラフ状底鋼板の床版方向ひずみは，厚い断面にはひずみは発生するが，薄い断面にはひずみはほとんど発生しない．

トラフ状底鋼板と上フランジのひずみの不連続は，床版と桁の不完全合成度を意味し，また，中立軸位置は断面 B の方が床版（上）側にあることがわかる．これは，断面 A の床版損傷度が大きいことを示唆するものである．

静的載荷試験および損傷度調査を基に，明治橋の補修・補強方法の検討を進めるための基礎データが蓄積できた．

参考文献

土木学会（2001）：日本の近代土木遺産，2001.3

岡崎文雄（2002）：架設から百年 - 明治橋を保存しよう，大分合同新聞，2002.2

松井繁之，嶽下裕一（2003）：日本最古の合成床版を用いた鋼橋 - 明治橋 - 見聞録，第 3 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.283-288，2003.5

岡崎文雄（2004）：明治橋はなぜ鋼橋なのか，第 4 回道路橋床版シンポジウム，pp.1-10，2004.11

杉原伸泰，財津公明，松井繁之，堀川都志雄（2004）：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 4 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.29-36，2004.11

山口浩平，高林和生，内田大介，日野伸一（2004）：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 4 回道路橋床版シンポジウム，pp.37-42，2004.11

2. 健全度評価

2.1 載荷試験結果に対する解析的検討

明治橋保存活動の一環として、静的載荷試験が実施されている[山口ら, 2004]。それらの試験結果をもとに、解析的検討を実施し、本橋が有する耐荷性能および安全性を推定することとした。

2.1.1 解析モデル

本橋保存活動[杉原ら, 2004]は、A1 橋台-P1 橋脚間と P1 橋脚-A2 橋台間は、同じ構造緒元と考えたこと、また P1 橋脚-A2 橋台間は一部に比較的健全な箇所が残ることから、P1 橋脚-A2 橋台間の 1 径間を調査対象範囲としている。本橋の解析モデルも、P1 橋脚箇所、主桁が連続していないことから、調査対象範囲と同様の 1 径間とした。なお、橋軸直角方向に対称性を有することから、1/2 モデルとして取り扱うこととする。全体の解析モデルを図 - 2.1.1 に、床版とトラフ状底鋼板を取り除いた主桁、対傾構のモデルを図 - 2.1.2 に示す。

床版コンクリートはソリッド要素、トラフ状底鋼板・主桁はシェル要素、対傾構はロッド要素でモデル化した。なお床版コンクリートとトラフ状底鋼板は、完全合成挙動するものとして取り扱うこととする。

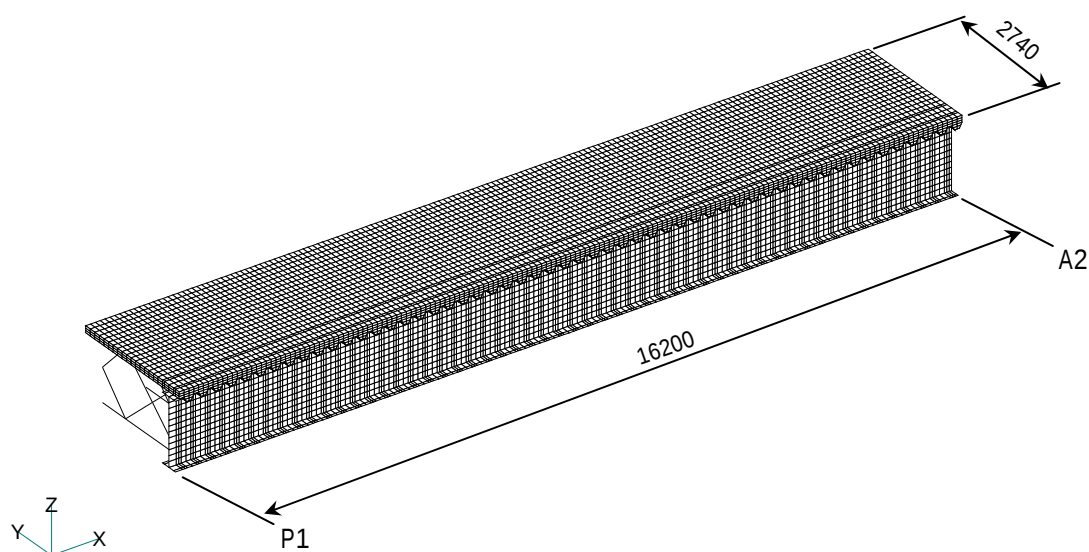


図 - 2.1.1 解析モデル図

床版コンクリート・トラフ状底鋼板と主桁上フランジは、図 - 2.1.3 に示すようにリベットで結合されている。本解析モデルでは、床版コンクリート・トラフ状底鋼板と主桁上フランジは、完全合成挙動する場合、不完全合成挙動する場合を想定して、リベット位置に節点間バネを設定した。バネ値については、完全合成挙動の場合は剛な値、不完全合成挙動の場合は微小な値を用いている。モデルの詳細を図 - 2.1.4 に示す。各対象部位のモデル化に際して、使用した要素を表 - 2.1.1 に示す。

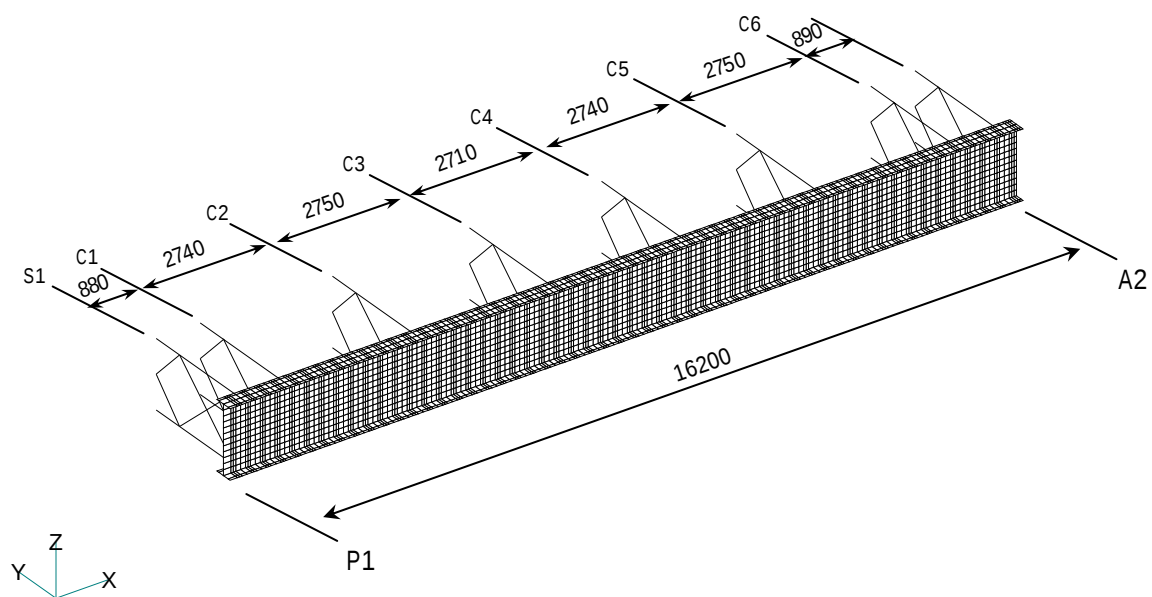


図 - 2. 1. 2 主桁・対傾構モデル図

表 - 2. 1. 1 各部位のモデル化

対象部位	モデル化要素
床版コンクリート	ソリッド要素
トラフ状底鋼板	シェル要素
主桁	シェル要素
対傾構	ロッド要素
リベット	節点間ばね

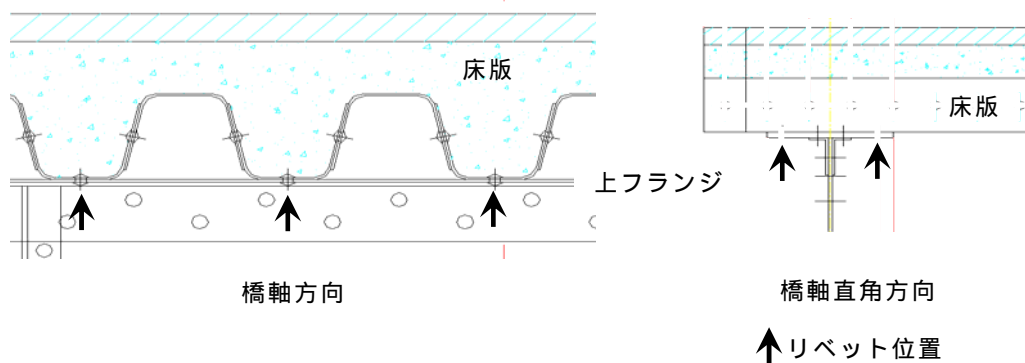


図 - 2. 1. 3 リベット配置図

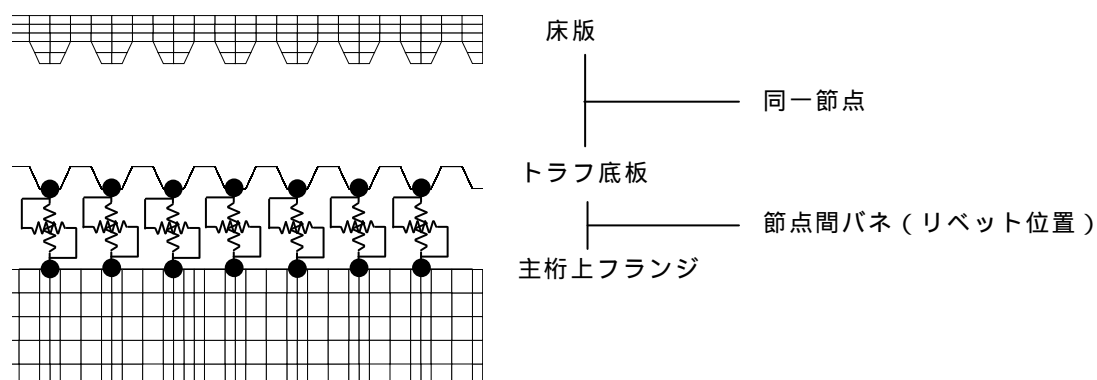


図 - 2.1.4 リベット配置図

(1) 材料特性

本橋における床版コンクリートのコア試験体を用いた圧縮強度試験結果を表 - 2.1.2 に示す。本解析では, No.1 ~ No.6, No.8 の 7 つの供試体うち, 静弾性係数が著しく小さい No.4 を除いた 6 つの供試体における静弾性係数の平均値を床版コンクリートのヤング係数として採用することとした。解析に用いた各部位の材料定数を表 - 2.1.3 に示す。

表-2.1.2 コンクリート強度試験結果

供試体	静弾性係数
No.1	1.11×10^4
No.2	1.44×10^4
No.3	1.43×10^4
No.4	0.56×10^4
No.5	1.61×10^4
No.6	1.68×10^4
No.8	1.48×10^4

単位: N/mm^2

表-2.1.3 解析に用いた材料特性

部位	静弾性係数 $E (\text{N/mm}^2)$	ポアソン比	備考
床版コンクリート	1.46×10^4	0.167	静弾性係数は実測の平均値
主桁, トラフ状底鋼板, 対傾構	2.00×10^5	0.3	----

(2) 主桁板厚，対傾構諸量

本橋の構造調査により測定された，主桁断面の板厚変化位置と主桁断面図を図 - 2.1.5 に，同様の構造調査より測定された板厚の結果を表 - 2.1.4 に示す．

補強プレートは，図 - 2.1.5 の主桁断面図に示すように上フランジ，下フランジに配置されているものである．なお本解析では，フランジ取付材は考慮しないこととした．

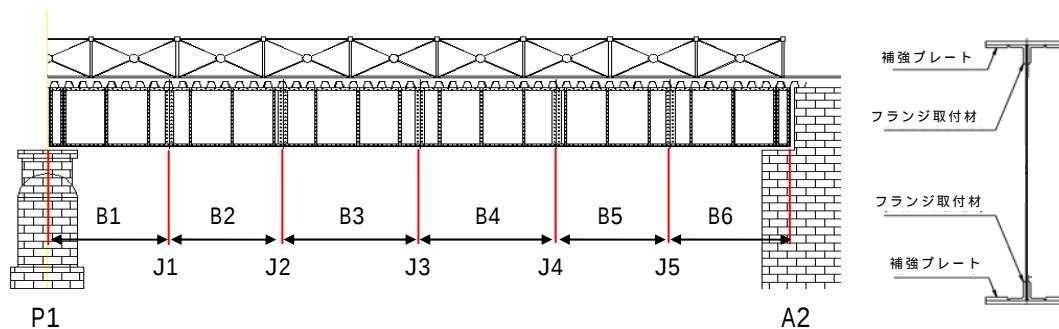


図 - 2.1.5 板厚変化位置，主桁断面図

表-2.1.4 主桁板厚測定データ

	B1	B2	B3	B4	B5	B6
上フランジ	9mm	17mm	16mm	15mm	18mm	9.0mm
補強プレート	14mm × 106mm (J1 より A2 側 840mm)			13mm × 108mm (J5 より P1 側 850mm)		
ウェブ	9mm	9mm	9mm	9mm	9mm	9mm
下フランジ	6mm	14mm	12mm	18mm	12mm	6mm
補強プレート	18mm × 105mm (J2 より A2 側 1080mm)			18mm × 105mm (J4 より P1 側 1110mm)		

* 補強プレートは，厚 × 幅

対傾構に関する詳細寸法を図 - 2.1.6 に示す．なお，これら対傾構は，図 - 2.1.7 に示す本橋の P1 橋脚-A2 橋台の間において S1，C1～C6，S2 に配置されている．

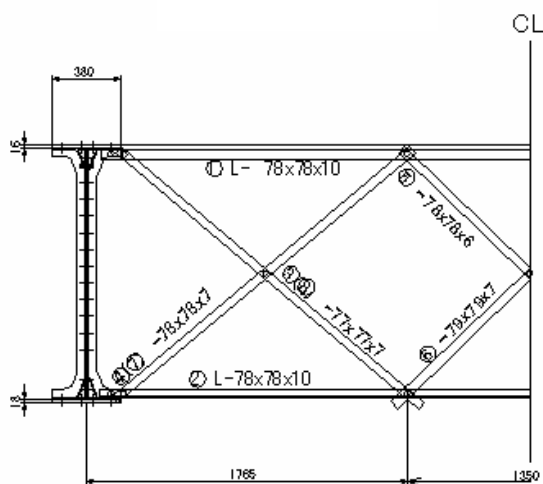


図 - 2.1.6 対傾構詳細図

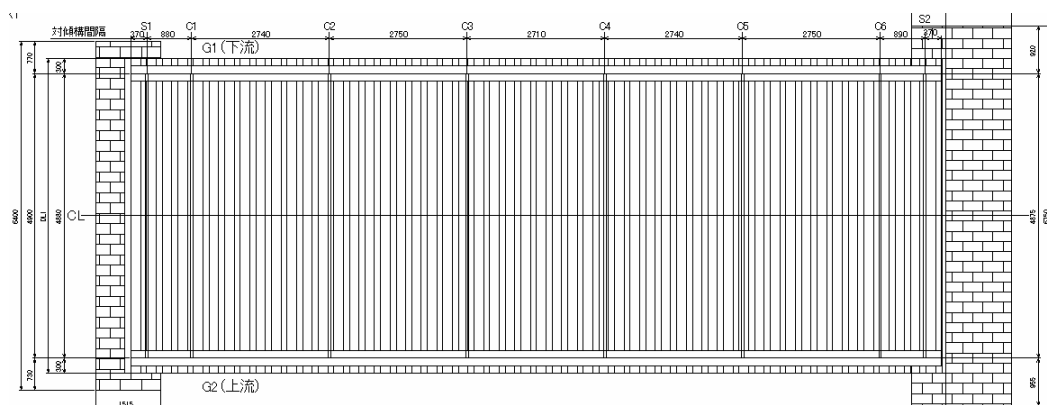


図 - 2.1.7 対傾構配置箇所

床版コンクリート，トラフ状底鋼板の詳細図を図 - 2.1.8 に示す．

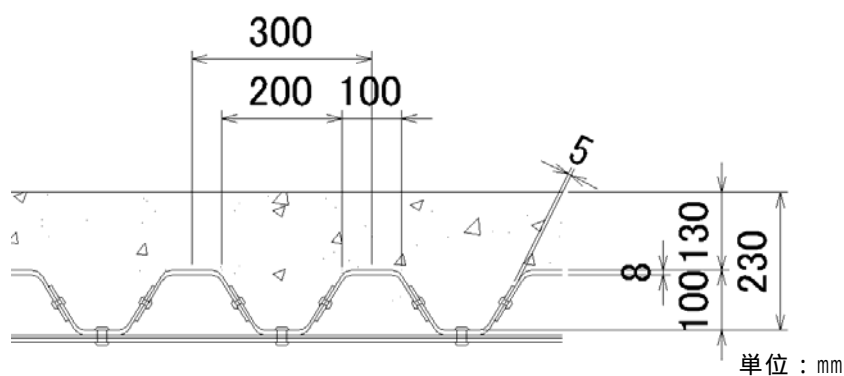


図 - 2.1.8 床版断面詳細図

構造調査より得られた主桁，対傾構，およびトラフ状底鋼板の板厚，寸法の実測値を，解析モデルに忠実に反映する．

(3) 境界条件

解析モデルは，橋軸直角方向に対称性を有するため，図 - 2.1.9 に示すような境界条件を設定した．桁端部の S1 側はピン支持，S2 側も土砂が堆積しており橋軸方向には移動しないことからピン支持としている．さらに，P1 橋脚部では，トラフ状底鋼板が連続していること，A2 桁端部では，土砂が堆積しており回転変形を拘束すると考えたことから，上フランジ位置で橋軸方向を拘束することとした．図 - 2.1.9 に，本解析で採用した境界条件を示す．

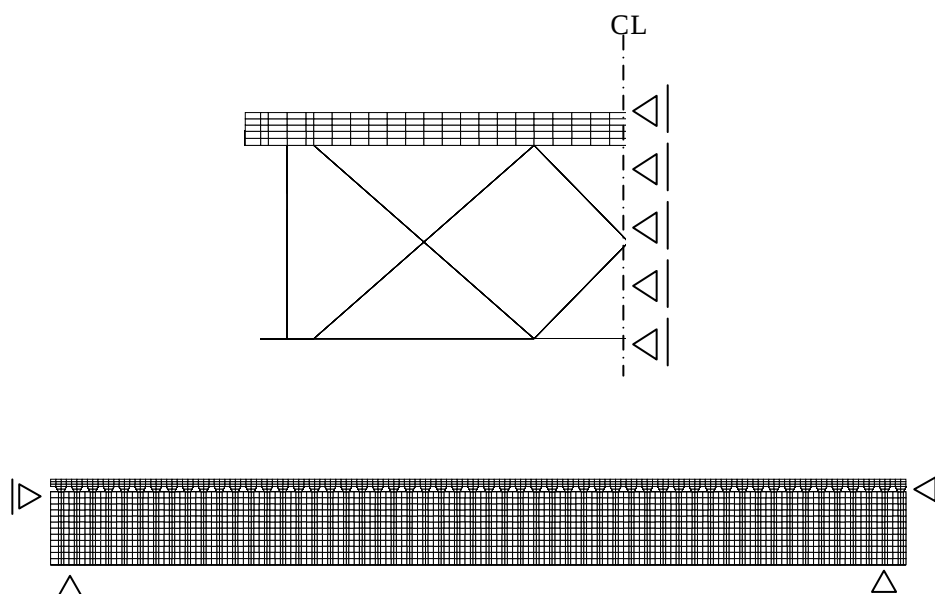


図 - 2.1.9 境界条件

2.1.2 主桁

本解析で、実施した解析ケースを表 - 2.1.5 に示す。静的載荷試験では、図 - 2.1.10 に示す散水車荷重を用いており、総重量(48.9kN)の軸重は、後輪が、30.5kN、前輪が 18.4kN である。載荷位置は、図 - 2.1.11 に示すように、P1-A2 支間中央(B 断面)に後輪荷重を、幅員方向については、床版支間中央に載荷されるケースとした。ケース①は、実測値の確認モデルとして、静的載荷試験と同様の荷重条件を採用し、主桁と床版の結合条件を、非合成または合成として実施した解析ケースである。

また現橋では、床版上面は、土砂に覆われていたため、現橋の実状を考慮したケース（土砂＋舗装＋群集）、土砂を取り除くことを想定したケース（舗装＋群集）も実施した。

土砂荷重、舗装荷重、群集荷重に関する荷重条件を図 - 2.1.12 に示す。土砂は、50cm 堆積していること、舗装は、7cm であることなどを考慮して載荷した。各荷重に関する詳細を表 - 2.1.6 に示す。

表-2.1.5 解析ケース（断面 B 載荷時）

ケース	合成/非合成	荷重	備考
実測値	—	散水車	静的載荷試験
①	非合成	散水車	実測値の確認モデル
②	合成	散水車	
③	合成	土砂＋舗装＋群集	現橋のモデル
④	合成	舗装＋群集	

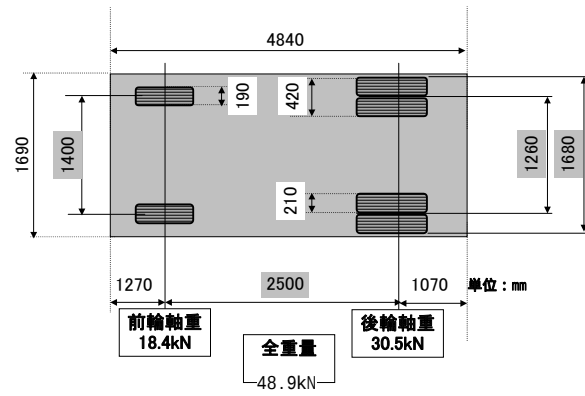


図 - 2.1.10 散水車荷重

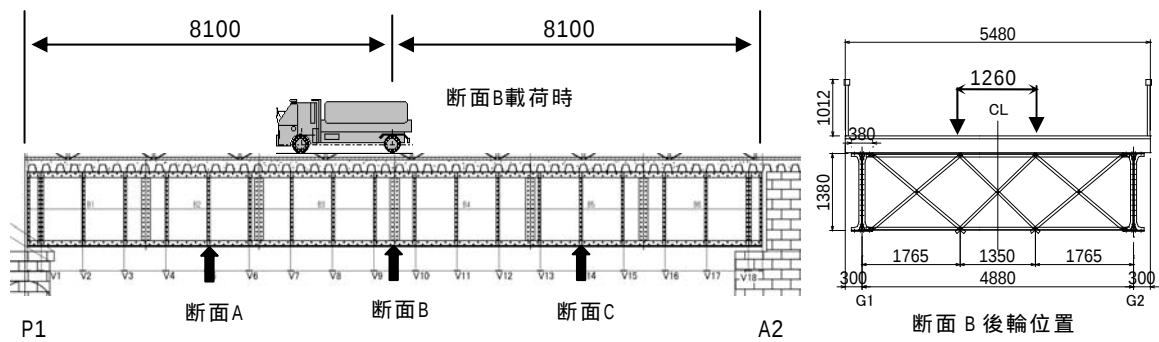


図 - 2.1.11 載荷位置 (解析ケース)

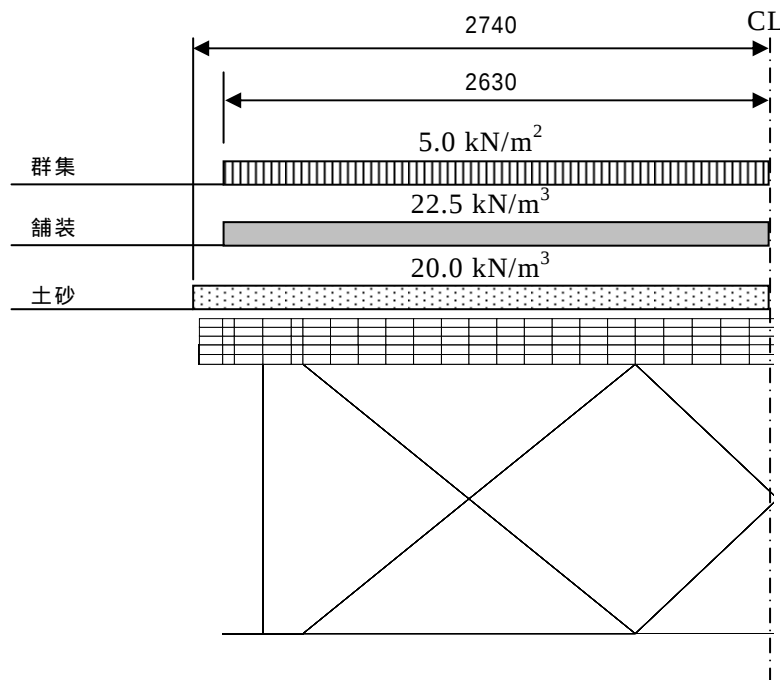


図 - 2.1.12 荷重図 (解析ケース)

表-2.1.6 荷重概要

	荷重	備考
群集荷重	5.0kN/m^2	--
舗装荷重	22.5kN/m^3	厚さ 7cm
土砂	20.0kN/m^3	厚さ 50cm

図 - 2.1.13 に示す断面 B における主桁のひずみ分布を図 - 2.1.14 ,および図 - 2.1.15 に , 断面 B における主桁のたわみを図 - 2.1.16 に示す . 図 - 2.1.14 から , 主桁のひずみ実測値は , 主桁と床版間が非合成としたケース と , 合成としたケース の解析結果の間に分布しており , 不完全ではあるが合成挙動を示していることがわかる .

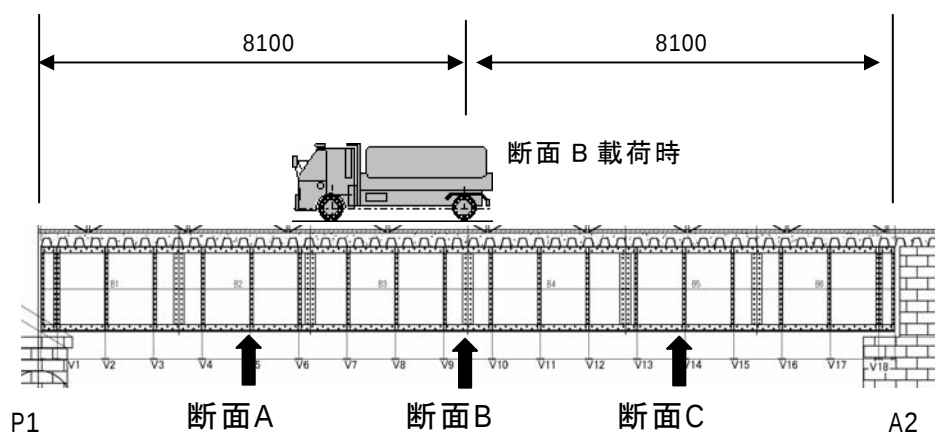


図 - 2.1.13 着目断面

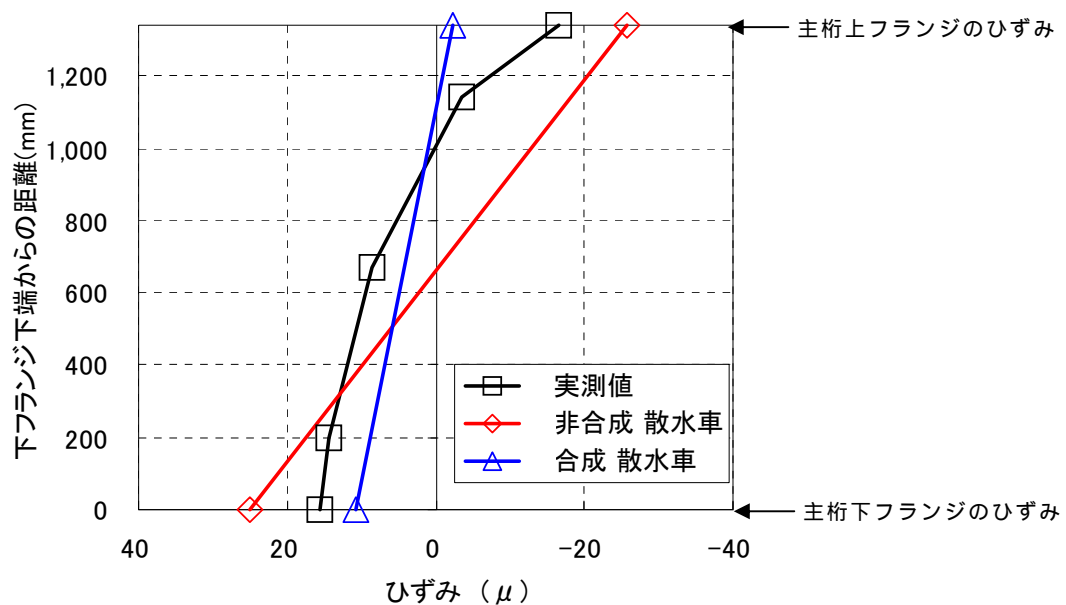


図 - 2.1.14 主桁のひずみ分布 (実測値の確認モデル)

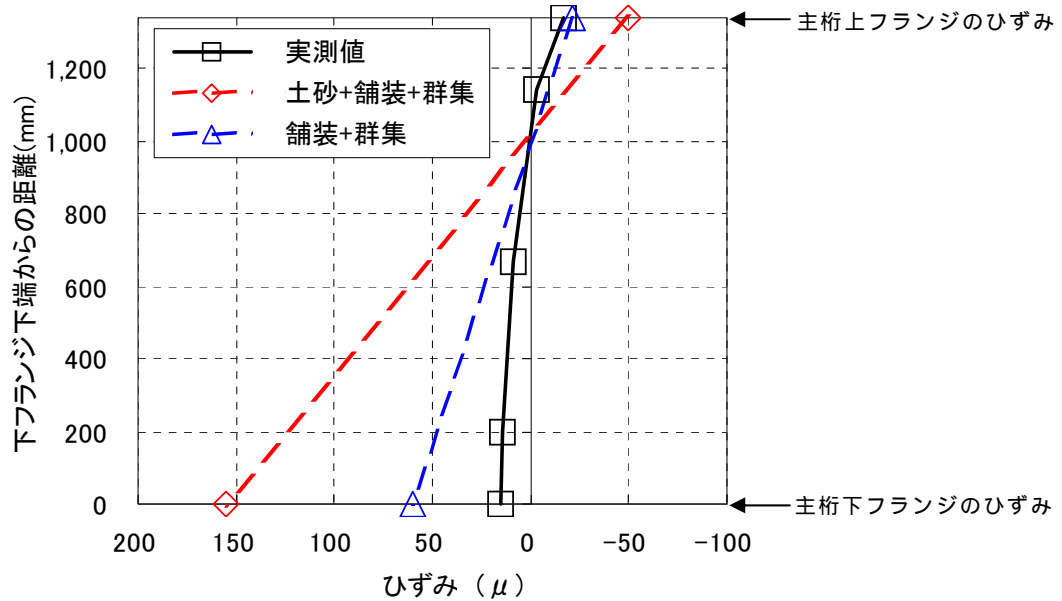


図 - 2.1.15 主桁のひずみ分布（現橋のモデル）

図 - 2.1.15 から，ケース（舗装 + 群集）の主桁下縁のひずみは，ケース（土砂 + 舗装 + 群集）における主桁下縁のひずみの 4 割程度になることがわかった．同様に，図 - 2.1.16 からケース（舗装 + 群集）の主桁のたわみは，ケース（土砂 + 舗装 + 群集）における主桁のたわみの 4 割程度であることがわかる．

以上の結果から，土砂を撤去することで死荷重時の主桁応力は，大幅に低減することがわかり，安全性の確保に繋がるものと考えられる．

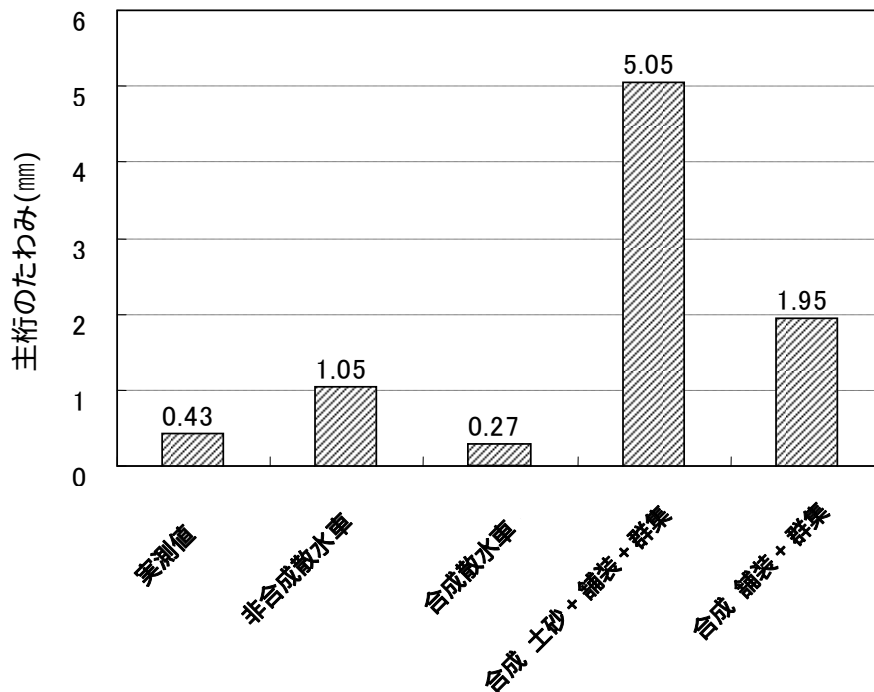


図 - 2.1.16 主桁のたわみ

2.1.3 床版

静的載荷試験では、主桁に着目した解析と同様、2.1.2における図 - 2.1.10 に示す散水車荷重を用いており、総重量(48.9kN)の軸重は、後輪が、30.5kN、前輪が 18.4kN である。載荷位置も、主桁での解析同様、2.1.2における図 - 2.1.11 に示すような、P1-A2 支間中央（B 断面）に後輪荷重を、幅員方向については、床版支間中央に載荷されるケースを採用した。ケース は、実測値の確認モデルとして、静的載荷試験と同様の荷重条件を用いた。ケース は、主桁での解析モデルと同様のモデルを使用した。ケース は、J スティフナーによる主桁上フランジの首振り変形の拘束作用を考慮するモデルである。本解析では、床版の鉛直変位から主桁の鉛直変位を差し引いた相対鉛直変位に着目することから、簡易的ではあるが、図 - 2.1.17 に示すように、主桁上フランジの鉛直方向変位を拘束した。なおケース は、床版の挙動に対して、主桁の変形による対傾構の影響を考慮したモデルであるが、ケース は、主桁に変形が発生しないため、主桁・対傾構の影響は反映されていない。実施した解析ケースを表 - 2.1.7 に示す。

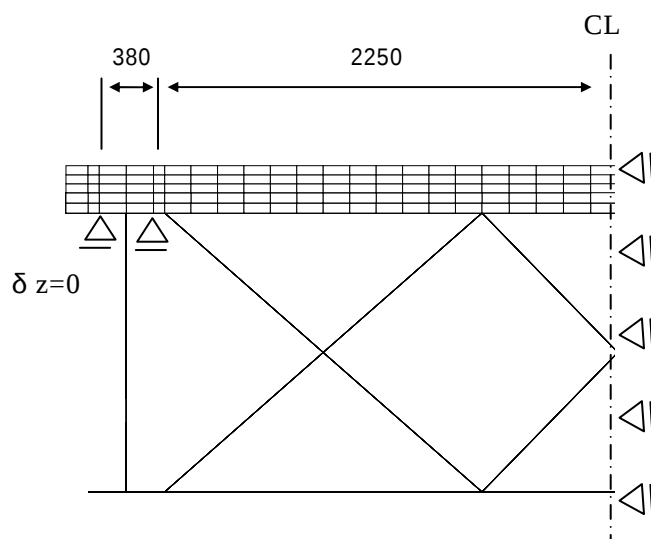


図 - 2.1.17 ケース 境界条件の設定

表-2.1.7 解析ケース（断面 B 載荷時）

ケース	合成 / 非合成	荷重	備考
実測値	-	散水車	静的載荷試験
	合成	散水車	---
	-	散水車	主桁上フランジ位置鉛直拘束

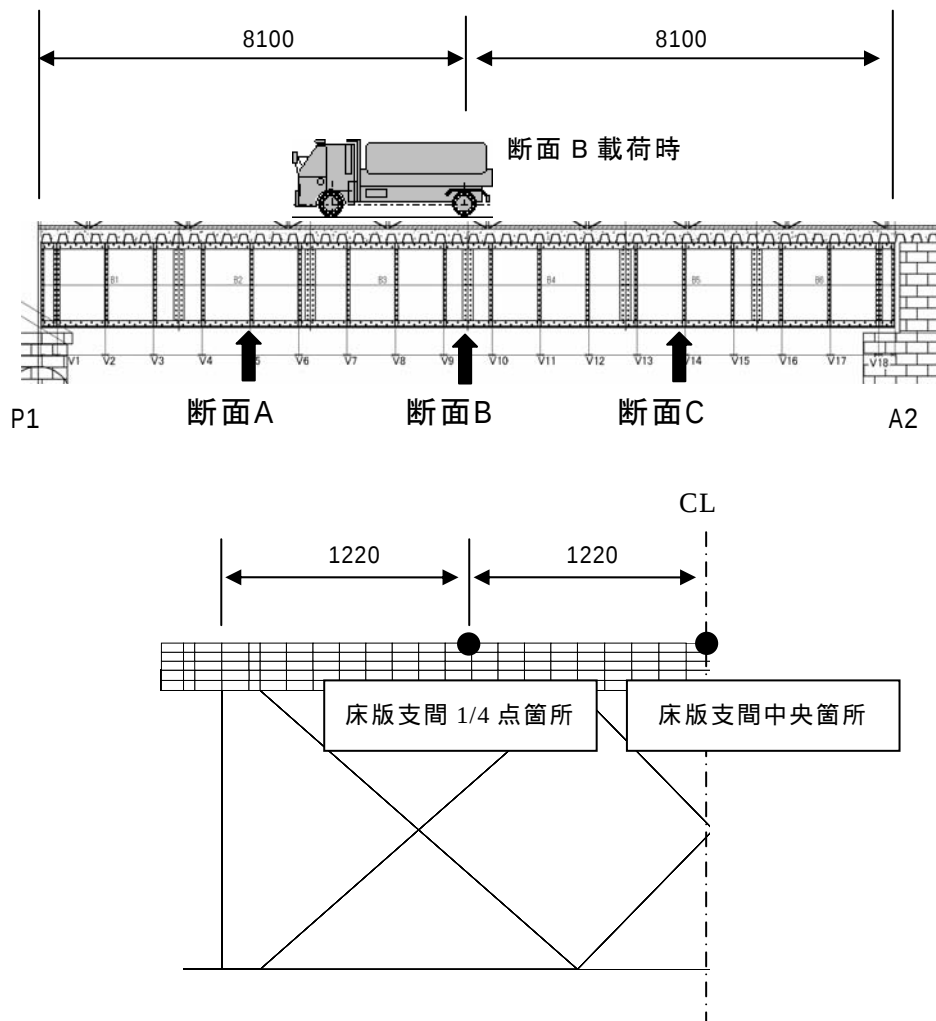


図 - 2.1.18 変位着目位置（断面 B，床版支間中央箇所，床版支間 1/4 点箇所）

表-2.1.8 解析結果（床版鉛直たわみ）単位：mm

ケース	床版支間 1/4 点箇所	床版支間中央箇所
実測値	0.175	0.280
ケース	0.415	0.658
ケース	0.172	0.289

図 - 2.1.18 に示すように，断面 B の床版支間中央および，床版支間 1/4 点におけるたわみの解析結果を表 - 2.1.8 に示す．実測値とケース の解析結果を比較するとケース のたわみは，床版支間中央箇所，床版支間 1/4 点箇所とも，実測値の 2 倍以上大きな鉛直たわみとなっていることがわかる．それに対し，主桁上フランジと主桁ウェブに結合されている J スティフナーによる主桁上フランジの拘束を考慮したケース の鉛直たわみは，床版支間中央箇所，床版支間 1/4 点箇所とも，実測値の鉛直たわみとほぼ同様となっており，実橋では，J スティフナーによる主桁上フランジの拘束が作用していることが予想される．

このことは，[杉原ら，2004] によって報告されているように，J スティフナーにき裂が発生していることも，本解析結果を示唆する内容であることが推測される．

2.2 現行の設計法に基づく検討

明治橋は、隣接する新明治橋が建設される昭和 36（1961）年までは国道 10 号の道路橋として供用され、その後は歩道橋として、現在まで使用されている。今後も歩道橋として供用を継続するために、安全性に着目した応力度的な問題の検討を行う必要がある。そこで本節では、構造・損傷度調査や使用材料の強度・成分調査の結果に基づき、解析的な手法による残存耐力の算出等の検討を行った。

2.2.1 主桁

主桁の安全性の確保については、主桁断面の応力度照査、荷重の大きさに着目し、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。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/m^2 ）を使用する。床版と桁の合成効果は考慮せず、非合成桁として照査する。主桁断面は腐食により板厚が減少しているため、図 - 2.2.1 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 - 2.2.1 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/mm^2 であり、応力度照査に用いる鋼材の許容応力度 140N/mm^2 と比較して十分な余裕を有している。しかしながら、主桁断面は鋼材の腐食が進み、局部的に観ると図 - 2.2.2 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 - 2.2.2 に示す値となる。この結果は、許容応力度 140N/mm^2 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/mm^2 には達しない。

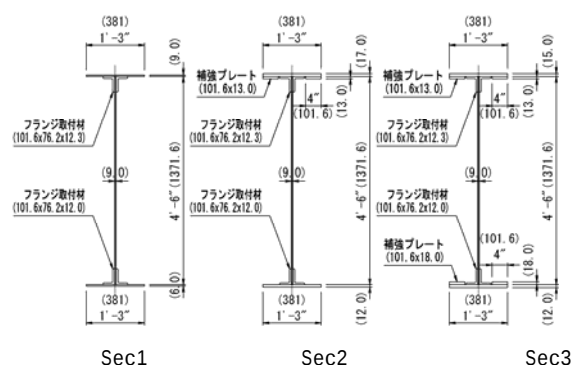


図 - 2.2.1 明治橋の主桁断面（実測板厚）

表 - 2.2.1 断面計算結果（活荷重：群集荷重，実測板厚）

	Sec.1 支間側	Joint フランジ継手	Sec.2 支間側	Sec.3 支間中央
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
同上（孔引き後）(N/mm ²)	70.7	63.1	75.9	62.2
活荷重たわみ (mm)	-	-	-	2.8

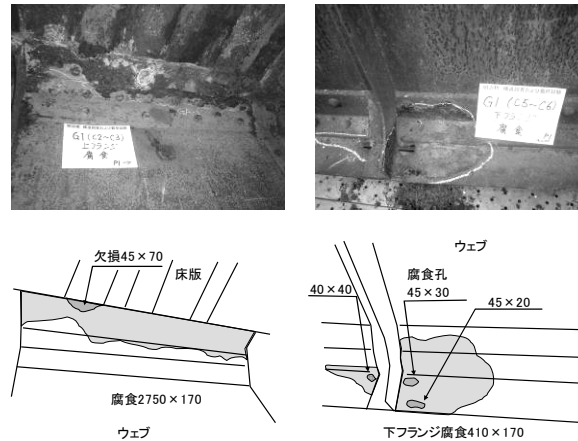


図 - 2.2.2 主桁断面の損傷状況

表 - 2.2.2 断面計算結果（活荷重：群集荷重，欠損考慮）

	Sec.1 支間側	Sec.2 支間側	Sec.3 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

2.2.2 床版

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効果は考慮せず，トラフ状底鋼板のみで荷重に抵抗するものとする．床版の断面計算結果を表 - 2.2.3 に示す．

表 - 2.2.3 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

トラフ状底鋼板の発生応力度は 98.6N/mm² であり，応力度照査に用いるトラフ状底鋼板の許容応力度を 140N/mm² とすると，腐食による板厚減少（構造・損傷度調査によると，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)の引張強さは 32tf/in² (486N/mm²)，降伏点は 16tf/in² (243N/mm²) が使用されており，現在の SS400 材と同等であると考えた．

明治橋は昭和 36 (1961) 年まで国道 10 号として供用されていた．前述したように，輪荷重をトラフ状底鋼板のみで支えようと考えると，トラフ状底鋼板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，トラフ状底鋼板が大きく変形（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，トラフ状底鋼板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，活荷重断面力は次式を使用する．

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

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

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 - 2.2.4 に，これらの条件を使用した断面計算結果を表 - 2.2.5 に示す．トラフ状底鋼板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．トラフ状底鋼板の引張応力度は 77.6N/mm^2 ，コンクリートの圧縮応力度は 5.2N/mm^2 であり，トラフ状底鋼板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 - 2.2.4 トラフ形鋼床版の断面性能

		1組あたり (/12")	1.0mあたり (/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^3)	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^3)	2311.2	7582.7
	トラフ形鋼断面定数 (cm^3)	494.3	1622.0

表 - 2.2.5 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 ($\text{kN} \cdot \text{m/m}$)	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	-	78.4kN (1輪あたり)		39.28	24.20	5.18
合 計	-	-	-	56.88	77.64	

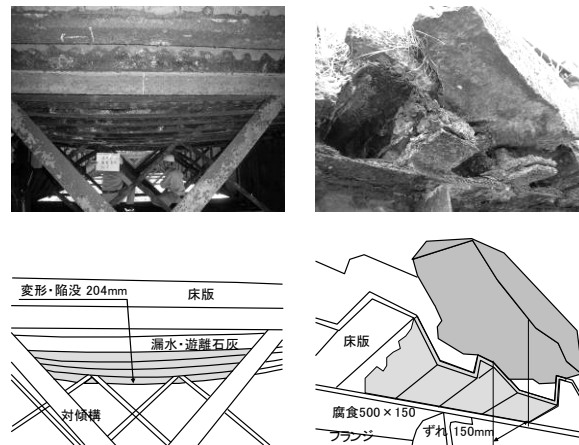


図 - 2.2.3 床版の損傷状況

現在の明治橋の床版は、損傷がなく健全な部分と、図 - 2.2.3 のようにトラフ状底鋼板が大きく変形（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/m^2)に対する耐力を有していると考えられる。

参考文献

- 杉原伸泰，財津公明，松井繁之，堀川都志雄（2004）：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4回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.29-36，2004.11
- 山口浩平，高林和生，内田大介，日野伸一（2004）：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4回道路橋床版シンポジウム，pp.37-42，2004.11
- 野瀬智也，山口浩平，高林和生，内田大介，堀川都志雄（2005）：現存する日本最古の鋼鈑桁道路橋 明治橋の静的載荷試験，第60回土木学会年次学術講演会講演概要集，CS10-0013，pp.325-326，2005.

3. 保全方法の検討と補修計画

3.1 保全方法の検討

明治橋の保全方法を検討するにあたっては、この橋を土木遺産と位置づけ、その価値を失わないことを基本とする。土木構造物の歴史的価値は、対象物への調査研究の動向、行政施策などによって一概に評価するのは難しい面も多く、明治橋のように損傷の著しい橋梁に関しては、既存のマニュアルに則した考え方にあてはまらない部分も多いと考えられるが、ここでは、歴史的鋼橋の補修・補強マニュアル〔土木学会、2006〕の考え方を参考にして検討を行う。

保全すべき歴史的価値としては、第 編で論じたとおり 技術、意匠、系譜の3つの評価側面が挙げられる。これらの歴史的価値を保全する方法として、1) 継続的維持、2) 保守、3) 再生、4) 復元、5) 保存という5つが考えられる。明治橋の保全については、現在のままの供用（自転車歩行者道）を前提とした保全を想定し、1) 継続的維持と2) 保守の2つが該当する。なお、前述のマニュアルによると、1) 継続的維持は「現状のまま供用しながら機能を維持する保全方針」、2) 保守は「橋梁として要求される機能を継続、向上するため、部分的に改変を許容する保全方針」と定義されているが、1) 継続的維持を含めて2) 保守で行う補修の範囲は様々な解釈をあてはめることができる。ここでは、これらを明治橋を維持するために必要最低限である 継続的維持のための最低限の補修、保守の頻度や費用の低減と歩行者が利用する上で十分となる安全対策を考慮した 簡易的な補修、景観や文化財としての価値を考慮した 複合的な補修の3つとしてとらえ検討を行う。

表-3.1.1 保全方法とその適用範囲（例） 歴史的鋼橋の補修・補強マニュアル〔土木学会、2006〕

	概 要	供用の有無	移設	該当する補修・補強の例
1) 継続的維持	現状の機能を維持	○	×	・部分的、軽微な補修 ・塗装の塗替え
2) 保守	小規模な改変、改造	○	×	・床版補強 ・床組補強 ・部分的な主構の補強 ・耐震補強 ・高欄の改修
3) 再生	外観の変更を伴う大規模な改変、改造	○	どちらでも可	2) と以下の補修・補強 ・用途変更 （たとえば鉄道橋を歩道橋に転用など） ・支間の短縮、延長 ・幅員の拡幅（歩道添架）、縮小 ・新たな構造部材の追加
4) 復元	オリジナルの機能や外観を再現	どちらでも可	どちらでも可	・架替えに伴い、旧橋を移設して再利用、あるいは公園内などの展示
5) 保存	現状の状態を維持	どちらでも可	×	・架替えの後、旧橋を供用せずにそのまま残置

3.2 部位ごとの補修方法

明治橋という土木構造物を構成している部位に細分すると，上部構造である床版や鋼桁，下部構造である橋台や橋脚，橋面構造である高欄や舗装などに分けることができる．ここでは，保全方法の枠組みではなく，構造部位に着目した補修・補強方法について列挙する．

3.2.1 床版

明治橋の床版は，トラフ状底鋼板を組み合わせた鋼材に無筋コンクリートを打込んで構成されているが，損傷状況として，床版張出部コンクリートのずれや剥落，床版張出部トラフ状底鋼板の腐食による欠損，床版支間部トラフ状底鋼板の変形，コンクリートのひび割れや砂利化(コンクリートのセメント成分が失われ骨材のみが残っている状態)が確認されている．



写真-3.2.1 コンクリートのずれ



写真-3.2.2 トラフ状底鋼板の腐食



写真-3.2.3 トラフ状底鋼板の変形



写真-3.2.4 コンクリートのひび割れ



写真-3.2.5 コンクリートの砂利化



写真-3.2.6 砂利化した部分のコア

床版コンクリートの損傷は著しく進行し、荷重を支持する床版として機能していない部分がある。ひび割れの発生している部分では、コンクリート厚 25cm に対して採取されたコアの長さは約 16cm であり、トラフ状底鋼板から 9cm 程度が砂利化している。また、コンクリートを支えているトラフ状底鋼板の損傷も発生している。補修方法としては下記が考えられる。

(1) 床版張出部端面の断面修復と止水

a) 現状の問題点

床版張出部端面はコンクリートの劣化が進み、トラフ状底鋼板の腐食や桁の腐食を進行させているため、雨水などが浸入しないような対策を施す必要がある。

b) 補修方法の内容

コンクリート欠損部分は新規コンクリートの打ち足し、既設コンクリートが残存している部分はシール材や樹脂注入による止水が考えられる。

ずれの大きなコンクリートの撤去

コンクリート欠損部の打ち足し

止水部分の清掃

シール材塗布や樹脂注入

c) 効果

床版内部への水の浸入を遮断し、床版からの漏水が原因となるトラフ状底鋼板の腐食や桁の腐食進行を防止できる。

(2) コンクリートひび割れ部の補修

a) 現状の問題点

トラフ状底鋼板変形部を中心に亀甲状に進展したコンクリートのひび割れは、床版内部への橋面からの雨水などの浸入を容易にし、トラフ状底鋼板の腐食を進行させている。

b) 補修方法の内容

樹脂注入によりひび割れを埋める方法が考えられる。

ひび割れ部分に流入した土砂などの清掃
樹脂注入

c) 効果

床版内部への水の浸入を遮断し，床版からの漏水が原因となるトラフ状底鋼板の腐食や桁の腐食進行を防止できる．

d) 留意事項

砂利化の進んでいるコンクリートに対しては効果がない．

(3) コンクリートの一部打ち替え

a) 現状の問題点

トラフ状底鋼板変形部を中心に亀甲状に進展したコンクリートのひび割れのうち，砂利化の進んだ部分は止水が難しく，また，荷重の分散効果が無いために，床版の部材として機能していない．さらに，砂利化した床版コンクリートは剛性がなく，活荷重によって容易に変形するが弾性体のように完全に元の形に戻らないため，活荷重載荷の繰り返しによりトラフ状底鋼板の変形を促進する恐れがある．

b) 補修方法の内容

損傷の進んだコンクリートの打ち替えが考えられる．

亀甲状にひび割れの進行したコンクリートのはつり

新規コンクリートの打込み

c) 効果

床版が正常な機能を取り戻し，トラフ状底鋼板の更なる変形を抑止できるほか，床版内部への水の浸入を遮断し，床版からの漏水が原因となるトラフ状底鋼板の腐食や桁の腐食進行を防止できる．

(4) トラフ状底鋼板の矯正や取替

a) 現状の問題点

変形したトラフ状底鋼板は，死荷重の持続的載荷や活荷重の載荷により，可能性が少ないながらも長期的に変形が進行して，座屈などにより突発的で部分的な床版の崩壊を招く恐れも考えられる．また，著しく腐食の進行した床版張出部端面のトラフ状底鋼板は，コンクリートの自重や活荷重に対して明らかに耐力が不足しており，欠落の危険性が高い．

b) 補修方法の内容

該当部分の床版コンクリートの打ち換えが前提となるが，加熱矯正などによる補修ほか，場合によっては新規作成部材への交換も考えられる．

損傷したコンクリートのはつり

変形したトラフ状底鋼板の撤去

矯正もしくは新規製作したトラフ状底鋼板の設置

コンクリートの打込み

c) 効果

部分的な床版の崩壊や欠落など，長期的な懸念事項を払拭できる．

3.2.2 舗装

床版上面には段差調整のためと考えられる 50cm 程度の土砂が敷かれており，その上にアスファルト舗装が施されている（写真-3.2.7，3.2.8 は調査のため土砂を撤去した時点のもの）．この土砂は，死荷重の増加や滞水による損傷進行の原因となっている．



写真-3.2.7 取付道路との段差

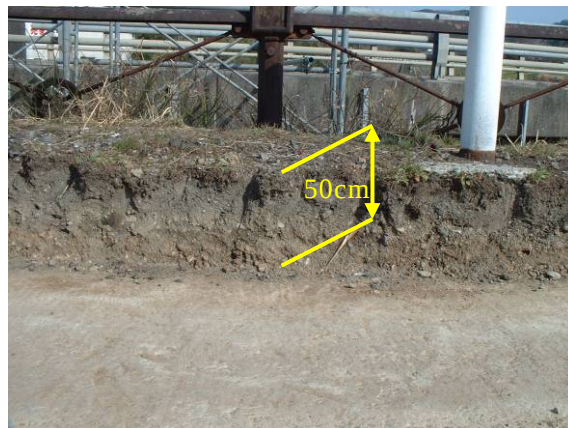


写真-3.2.8 橋面土砂



写真-3.2.9 取付状況(調査時)(大分側)



写真-3.2.10 取付状況(調査時)(佐伯側)



写真-3.2.11 取付状況(現在)(大分側)



写真-3.2.12 取付状況(現在)(佐伯側)

橋面上の土砂が明治橋に与えている悪影響は多数あり，現状の改善が必要である．対策として下記が考えられる．

(1) 土砂の撤去

a) 現状の問題点

橋面上の土砂は死荷重を増加させるだけでなく，雨水の滞水により湿潤環境を作り出し，高欄や床版張出部の損傷を促進させる原因となっている．

b) 補修方法の内容

床版上面の土砂を撤去して死荷重を減少させ，埋没している高欄下部を回復する．

土砂の撤去

接続道路のすりつけ

c) 効果

鋼桁の腐食や床版の損傷の原因となっている湿潤環境（滞水作用）が改善される．また，死荷重の減少により橋体への負荷が低減する．

d) 留意事項

橋梁部分に接続する道路の計画高調整を行う必要がある．特に，道路埋設物（マンホール）などに留意する必要がある．

(2) 舗装の敷設

a) 現状の問題点

橋面に排水勾配や排水装置がなく，橋面の雨水などが鋼材の腐食や床版の損傷を進行させる原因となっている．

b) 補修方法の内容

床版の不陸解消と排水勾配を設けるために，床版コンクリート上に舗装を敷設する．舗装と床版コンクリートの間には防水層を設置することが望ましい．また，橋面上の雨水が床版張出部や鋼桁に垂れることに起因する鋼材の腐食を防止するために，排水樋等の排水装置の設置が望まれる．

軽量コンクリートや発泡スチロールなどによる不陸調整

防水層の設置

アスファルト舗装

排水装置の設置

c) 効果

適切な排水対策により，床版への雨水の浸入を防止できる．また，橋面上の雨水に起因する鋼材の腐食を防止できる．

3.2.3 塗替え塗装

鋼材面の防錆を目的とした塗替え塗装は、旧塗膜の塗装系、塗替え時の劣化程度、塗替え後の塗膜に期待する耐久年数を考慮して選定する必要がある。明治橋は全体的に塗膜の劣化が著しく、鋼材の腐食が進んでいることから鋼材面からの塗替え塗装が必要である。塗膜の寿命を長くするためには、プラスト工法による1種素地調整が望ましいが、プラスト工法は研掃材や塗膜のケレンダストの飛散を伴うため、飛散防止ネットなどによる厳重な養生が必要となる。また、プラストされる鋼材の腐食が進行している場合は、研磨により母材自体が失われるため適さないこともある。これらを考慮すると、塗替え塗装の塗装仕様として下記の2つが考えられる。なお、腐食が著しい箇所は、素地調整後にパテなどによる断面修復が必要であると考えられる。



写真-3.2.13 主桁外側



写真-3.2.14 主桁内側

(1) 塗替え塗装

a) 現状の問題点

塗膜の劣化が著しく、鋼材の腐食が進んでいる。

b) 補修方法の内容

塗替え間隔を15～25年程度と想定して、下表に示す塗装仕様で塗替え塗装を行う。

表-3.2.1 塗替え間隔15～25年程度の塗装仕様

塗装工程	塗料種類	使用量 (g/m ²)	目標膜厚 (μm)
素地調整	1種もしくは2種	-	-
下塗り第1層	有機ジンクリッチペイント	240	30
下塗り第2層	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗り	200	60
下塗り第3層	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗り	200	60
中塗り	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗り	140	30
上塗り	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗り	120	25

使用量は、はけ・ローラー塗りの場合を示す。

c) 効果

鋼材の腐食進行を防止することにより、現状の鋼桁残存体力が維持できる。

d) 留意事項

素地調整により十分な除錆が行えることが前提となる。除錆が不十分であると塗膜の耐久性は大幅に劣り、塗替え間隔は短くなる

塗装色によっては明治橋のイメージが大きく変化するため、上塗り色の選定には注意が必要である。

3.2.4 高欄・親柱

明治橋の高欄は、鋳物の支柱を棒鋼で結んだ高欄であり、英国風の高欄と考えられる。ある程度の原形は留めているが、腐食が激しく高欄としては機能していない。また、遊間部分の高欄は喪失しており、8基設置されていたとされる親柱も現存していない。構造・損傷調査を行った時点では、高欄内側にガードレールが設置されており、高欄を隠すような配置となっていたため景観上好ましくなかったが、現在ではガードパイプに取り替えられており、以前と比べると違和感は少なくなっている。



写真-3.2.15 高欄全景



写真-3.2.16 高欄詳細



写真-3.2.17 高欄端部



写真-3.2.18 河床から発見された親柱

しかし、歴史的構造物には景観的な要素も重要であるため、下記のような対策をとることが望ましい。

(1) 高欄の修復

a) 現状の問題点

英国風の高欄は明治橋の特色の 1 つであり、景観的にみて文化財的な価値も高いと考えられるが、高欄の構成部材は腐食により失われつつある。

b) 補修方法の内容

腐食により欠損した棒形鋼を新規の部材と交換して高欄を修復する。

腐食部材の新規部材への取替

c) 効果

明治橋建設当時の高欄を再現することで、文化財として景観的な価値が向上する。

d) 留意事項

高欄の基部は RC 構造とするなど、床版の補修と合わせて行うとよい。建設当時の高欄は現行の高欄の基準を満足しておらず、利用者の安全確保上はフェンスの追加などの対策が必要となることも考えられるが、景観には十分な配慮が必要である。

(2) 親柱の復元

a) 現状の問題点

高欄の端部が存在せず、景観的に違和感がある。

b) 補修方法の内容

河床より発見された親柱から鋳型を作成して、失われた 8 基の親柱を復元する。

鋳型の作成

親柱の復元

c) 効果

明治橋建設当時の親柱を再現することで、文化財として景観的な価値が向上する。

3.2.5 鋼桁

明治橋の鋼桁は全体的に腐食が進み、一部のフランジは原形を留めていない箇所も見受けられるが、自転車や歩行者のみが渡る歩道橋としては十分な耐力が残存している。そのため、補強を行う必要はないが、Ｊスティフナー首部のき裂、リベットやボルトの脱落、腐食による局所的な欠損や肌隙などがあり、防錆上の問題がある。



写真-3.2.19 Jスティフナーのき裂



写真-3.2.20 ボルトの脱落



写真-3.2.21 下フランジの欠損

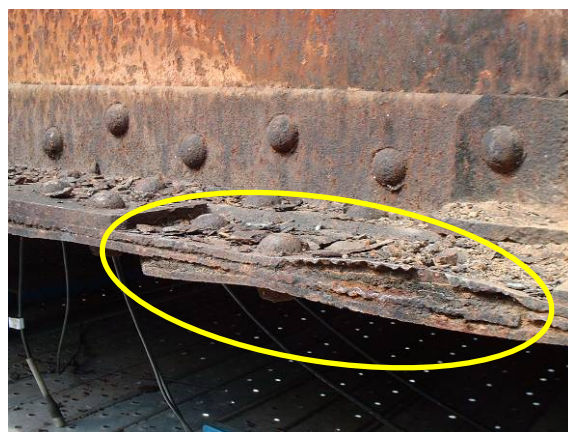


写真-3.2.22 継手部の肌隙

長期間塗替え塗装がおこなわれておらず、防錆のための塗膜はほとんど残っていない。水みちとなった部分や土砂が堆積していた部分の腐食が進み、構造部材としての断面が失われている部分がある。補修方法としては下記が考えられる。

(1) Jスティフナーの補修

a) 現状の問題点

母材を貫通したき裂あり、塗装などの表面的な防錆処理をおこなっても腐食が進行してしまうため、き裂部分の補修（き裂埋め）を行う必要がある。

b) 補修方法の内容

き裂部分へシーリング材や金属パテを充填して隙間を埋める方法や、き裂部分を溶接し

て補修する方法が考えられる．なお，Ｊスティフナーは明治橋の特徴の１つと考えられるため，新規部材への取替は考えない．

き裂部分の清掃

溶接もしくはシール材によるき裂補修

c) 効果

鋼材表面から内部へ通じる隙間がなくなるため，塗装などの防錆処理による鋼材の防食性能が高くなる．

d) 留意事項

補修方法として溶接を選択する場合は，溶接性の確認を行う必要がある．

(2) リベットやボルトの取替

a) 現状の問題点

脱落，あるいは腐食の進んだ（弛んでいる）リベットやボルトは，塗装などによる防錆処理では十分な防錆効果が期待できない．

b) 補修方法の内容

不具合のあるリベットやボルトは，新規部材へ取り替えることとする．

リベットやボルトの脱落部分の清掃

リベットやボルトの設置

c) 効果

母材への密着性が改善され，塗装などの防錆処理による鋼材の防食性能が高くなる．

d) 留意事項

現在でもリベットの施工は可能であるが，多くの制約があるためリベットとボルト頭形状が似ているトルシアボルトへ交換することも念頭に置く必要がある．

(3) 腐食による欠損部分の補修

a) 現状の問題点

局所的な欠損や鋼板や形鋼の肌隙部分は塗装による防錆が不十分となり，腐食の進展が懸念される．

b) 補修方法の内容

塗装に先立ち，鋼材の局所的な欠損や肌隙部分は充填材などにより穴埋めを行う．

該当部分の清掃

金属パテやエポキシ樹脂による孔（隙間）埋め

c) 効果

小さな孔こばや鋼材表面から内部へ通じる隙間がなくなるため，塗装などの防錆処理による鋼材の防食性能が高くなる．

d) 留意事項

部分的な充填が困難な場合には，一部を撤去して別途製作した新規部材と交換することも考えられるが，外観が大きく変わらないように留意する必要がある．

3.2.6 対傾構

明治橋の対傾構は、上下弦材が山形鋼、斜材が平形鋼により構成されている。斜材に使われている平形鋼は面外剛性が乏しく、大きく変形している箇所があり、腐食による橋台側端対傾構の欠落、床版陥没部分を中心とした対傾構の座屈などの損傷が確認されている。



写真-3.2.23 対傾構の欠損



写真-3.2.24 対傾構の座屈

端対傾構は遊間部分からの土砂や雨水の浸入により厳しい腐食環境下にあったため、腐食により部材が欠落している。また、トラフ状底鋼板の変形（床版の陥没）により、大きな圧縮力を受けた対傾構部材は座屈を起こしている。補修方法としては下記が考えられる。

(1) 対傾構の補修

a) 現状の問題点

活荷重などの一般的な荷重に限って議論すると、対傾構はあまり重要な構造部材ではないが、明治橋には横桁や横構が無く、地震などの水平方向の荷重に対しては対傾構の役割が大きい。構造部材として機能しない対傾構では、地震時に桁が横倒れを起こす危険性が高い。

b) 補修方法の内容

横荷重に対して抵抗する構造部材として補修を行うことが望ましいが、部材の損傷が大きいため取替や新規設置が前提となる。

変形や欠落した対傾構の撤去（別の場所に新規設置する場合は撤去しない）

新規作成した対傾構の取付

c) 効果

地震などの横荷重に対する抵抗性が向上する。

d) 留意事項

一般部の対傾構は平鋼を用いて本来の形に復元することを基本とするが、支点上対傾構の補修にあたっては現状のものを残し、剛性の高い山形鋼を使用したものを新たに追加することなども検討する余地がある。

3.2.7 支承

明治橋の支承は簡易的な平板支承であり，橋台側支承板のずれ，アンカーボルトの腐食が確認されている．



写真-3.2.25 支承板のずれ



写真-3.2.26 アンカーボルトの浮き

鋼桁の損傷に対して支承は比較的健全であるが，支承板の移動を抑制する部材がないため，支承板に大きなずれを生じている．また，アンカーボルト頭やナットの腐食が進行している部分もある．ナットや座金の厚さが腐食により減少して，アンカーボルトに浮きが生じている箇所がある．補修方法としては下記が考えられる．

(1) 支承板ずれの復旧

a) 現状の問題点

支承板のずれが進行すると支承板が外れる可能性があるため，支承板のずれを矯正する必要がある．また，支承板のずれを矯正しない場合でも，更なるずれを抑制するためにずれ防止機構の設置を検討する必要がある．

b) 補修方法の内容

ジャッキアップやクレーンによる桁の吊り上げなどの方法で一時的に支点反力を減少させた後，ずれている支承板を正規の位置に戻す．

ジャッキアップ

支承板の修復（ずれた支承板の元位置への復帰）

ジャッキダウン

c) 効果

地震などの横荷重に対する抵抗性が向上する．

d) 留意事項

支承板のずれを補正する際には，ジャッキによる鋼桁のジャッキアップやクレーンによる橋梁の吊り上げ等の措置が必要であるが，現状の明治橋は構造部材の損傷の程度が大きいいため，実施に際しては十分な検討が必要である．

(2) アンカーボルトの補修

a) 現状の問題点

ボルト頭部（ナット）の腐食が進んでいる．アンカーボルトが失われると，水平方向に支承を固定する部材が無くなる

b) 補修方法の内容

アンカーボルトの腐食の進行を防止するために塗装などの防錆処理を行う．

c) 効果

アンカーボルトの腐食の進行を防止して現状の状態を維持することにより，支承を水平方向に固定しておくことができる．

d) 留意事項

支承の構造上，上揚力に対する抵抗は不要なため，防錆に注意すれば特に耐力増強を目的とした補修を行う必要はない．

3.2.8 伸縮装置

明治橋の温度移動量は小さく，伸縮装置は設置されていない．



写真-3.2.27 桁遊間



写真-3.2.28 橋面遊間

一般的に橋面の遊間には伸縮装置が設置され，段差の解消や橋面からの雨水の流入を防止する措置が講じられている．しかしながら，明治橋には伸縮装置が設置されておらず，橋面から橋座面に土砂や雨水が流れ込み，鋼桁端部や支承部分の腐食を促進させているのが現状である．対策として下記が考えられる．

(1) 簡易的な伸縮装置の設置

a) 現状の問題点

橋面遊間部から橋座面に土砂や雨水が流れ込み，鋼桁端部や支承部分の腐食の原因となっている．

b) 補修方法の内容

橋面からの雨水や土砂の流入を防止するため，簡易な非排水型のゴム伸縮継手を設置する．

ゴム伸縮継手の設置

c) 効果

鋼桁端部や支承部分の腐食を防止できる。

3.2.9 落橋防止システム

明治橋には地震に対して落橋を防止するような構造物は設置されていない。ただし、100数年間落橋しておらず、また、現在では隣接する新橋が供用されており、災害復旧などの必要性は低い。



写真-3.2.29 橋台橋座



写真-3.2.30 橋脚橋座

主桁本数が少なく橋軸直角方向の移動に対しては落橋を起こしやすい構造である。橋座の橋軸直角方向幅はあまり広くなく、特に、橋脚の橋軸直角方向幅は余裕が少ない。耐震性能を向上させる対策として下記が考えられる。

(1) 変位制限構造の設置

a) 現状の問題点

支承の構造から水平力に対する抵抗力は小さいが、中間支点部の床版がつながっており、かつ橋梁の両端が胸壁であるため、橋軸方向への落橋は起こりにくい。しかしながら、橋軸直角方向への移動に抵抗する部材はなく、地震などで橋軸直角方向への水平力が加わると比較的簡単に落橋する危険がある。

b) 補修方法の内容

橋軸直角方向への落橋を防止するために、支承部の桁間側にコンクリートや鋼製ブラケット等の突起を設置して変位制限機能を付加する。

コンクリート突起や鋼製ブラケットの設置

c) 効果

橋軸直角方向地震による落橋を防止できる。

3.2.10 橋台・橋脚

明治橋の橋台と橋脚は石造であるが、目視調査では風化や傾きなどの異常は認められず、河川部分の洗掘を含めて基礎部分についても問題ないと考えられる。ただし、上部工の補修を実施するにあたっては、改めて下部構造の調査を実施するとよい。



写真-3.2.31 橋台全景



写真-3.2.32 橋脚石積み



写真-3.2.33 橋脚全景



写真-3.2.34 橋脚喫水面

3.3 補修計画案

構造解析などの検討により，自転車や歩行者のみが渡る歩道橋としては十分な耐力が残存しているため，耐力向上を目的とした補強を行う必要は無く，明治橋の保全方法としては，1) 継続的維持か 2) 保守でよいことが分かっている．これを考慮して，前述したように 継続的維持のための最低限の補修， 簡易的な補修， 複合的な補修の 3 種類を考えると，表-3.3.1 ような補修の組み合わせが考えられる．

表-3.3.1 補修計画案

補修部位	補 修 内 容		
	最低限の補修	簡易的な補修	複合的な補修
床 版	1) 土砂の撤去 2) トラフ状底鋼板や橋面の滞水を防止する排水装置の設置 3) 床版コンクリート表面への防水層の設置	1) 土砂の撤去 2) 床版張出部端面の止水 3) コンクリートのひび割れ部の樹脂注入などによる補修	1) 土砂の撤去 2) 床版張出部端面の止水 3) トラフ状底鋼板の矯正や取替 4) コンクリートのひび割れ部の打ち替え
舗 装	1) 不陸修正のための処理 2) 防水性のあるアスファルト舗装敷設	1) 不陸修正のための処理 2) 防水性のあるアスファルト舗装敷設	1) 不陸修正のための処理 2) 防水層の設置 3) 防水性のあるアスファルト舗装敷設
塗替え塗装	1) 2 種ケレンによる素地調整 2) 鋼桁の腐食による欠損部分の補修 3) 変性エポキシ樹脂塗料下塗による下塗り 4) ふっ素樹脂塗料による中・上塗り	1) 2 種ケレンによる素地調整 2) 鋼桁の腐食による欠損部分の補修 3) 変性エポキシ樹脂塗料下塗による下塗り 4) ふっ素樹脂塗料による中・上塗り	1) 1 種ケレンによる素地調整 2) 鋼桁の腐食による欠損部分の補修 3) ジンクリッチペイントによる下塗り 4) 変性エポキシ樹脂塗料下塗による下塗り 5) ふっ素樹脂塗料による中・上塗り
鋼 桁		1) Jスティフナーの補修 2) リベットやボルトの取替	1) Jスティフナーの補修 2) リベットやボルトの取替
支 承		1) 支承板ずれの復旧	1) 支承板ずれの復旧
高欄・親柱			1) 高欄の損傷部材取替による復元 2) 親柱の複製品による復元
伸縮装置			1) 非排水構造を目的とした簡易的な伸縮装置の設置
対傾構			1) 座屈した対傾構の取替や矯正 2) 欠落した端対傾構の取替
落橋防止システム			1) 変位制限構造の設置
橋台・橋脚			

3.3.1 継続的維持のための最低限の補修

鉄鋼部材の腐食を防止することのみを考えた保全方法であり、若干の下地処理は発生するが、基本的に塗替え塗装のみを行うこととする。部材の補修を行わないため、比較的こまめな点検が必要になる。また、床版そのものの補修を行わないため、床版コンクリートひび割れ部分からの水の侵入と、床版内に滞水を生じさせない措置として、防水層と水抜きが必須である。なお、塗替え間隔は10～15年程度と想定する。塗替え塗装の下地処理としては、道路橋塗装・防食便覧〔(社)日本道路協会, 2005〕によるとブラスト処理を用いた1種ケレンが望ましいとされているが、鉄鋼材料の腐食状態から施工が難しいと考えられる。このため、鋼道路橋塗装便覧〔(社)日本道路協会, 1990〕で一般的に採用されていた動力工具による2種ケレンを適用する。

(1) 塗装に先立つ下地処理

2種ケレンによる素地調整

腐食により欠損した部材断面部分の補修

(2) 床版の滞水防止

トラフ状底鋼板や橋面の滞水を防止する排水装置の設置

床版コンクリート表面への防水層の設置

(3) 塗替え塗装

弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗による下塗り

弱溶剤形ふっ素樹脂塗料による中・上塗り

3.3.2 簡易的な補修

塗装による防食に加えて、機能低下を防ぐ簡易的な部材補修を行う保全方法である。塗替え塗装のみの保全方法と比較すると、維持管理が行いやすくなるが、構造的に問題の多い部分を残しているため、他の土木構造物の維持管理と比較すると点検頻度を密にする必要がある。塗替え間隔は素地調整の程度にも因るが10～20年程度と想定する。

(1) 床版の補修

土砂の撤去

床版張出部端面の止水

コンクリートひび割れ部の樹脂注入などによる補修

(2) 鋼桁の補修

Jスティフナーの補修

リベットやボルトの取替

(3) 支承の補修

支承板ずれの復旧

(4) 塗装に先立つ下地処理

2 種ケレンによる素地調整

鋼桁の腐食による欠損部分の補修

(5) 塗替え塗装

弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗による下塗り

弱溶剤形ふっ素樹脂塗料による中・上塗り

(6) 舗装

不陸修正のための処理

防水性のあるアスファルト舗装敷設

3.3.3 複合的な補修

塗装による防食に加えて、維持補修費用の低減を目的とした部材補修を行う保全方法である。最低限の部材補修を行う保全方法と比較すると、供用する上で構造的に問題のある部分が無いため、一般的な土木構造物と同程度の維持管理を行えばよい。損傷の激しい部材は取替による補修を前提として、ブラスト処理による 1 種ケレンを実施し、塗替え間隔は 15～25 年程度と想定する。また、文化財としての価値を考慮して、景観的な面にも十分に配慮する。

(1) 床版の補修

土砂の撤去

床版張出部端面の止水

トラフ状底鋼板の矯正や取替

コンクリートひび割れ部の打ち替え

(2) 鋼桁の補修

J スティフナーの補修

リベットやボルトの取替

(3) 対傾構の補修

座屈した対傾構の取替

欠落した対傾構の取替

(4) 支承の補修

支承板ずれの復旧

(5) 塗装に先立つ下地処理

1 種ケレンによる素地調整

鋼桁の腐食による欠損部分の補修

(6) 塗替え塗装

有機ジンクリッチペイントによる下塗り
弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗りによる下塗り
弱溶剤形ふっ素樹脂塗料による中・上塗り

(7) 舗装

不陸修正のための処理
防水層の設置
アスファルト舗装敷設

(8) 伸縮装置の設置

非排水構造を目的とした簡易的な伸縮装置の設置

(9) 高欄・親柱の復元

高欄の損傷部材取替による復元
親柱の複製品による復元

(10) 落橋防止システムの設置

変位制限構造の設置

参考文献

(社)日本道路協会 (1990): 鋼道路橋塗装便覧, 丸善, 1990.6

(社)日本道路協会 (2005): 道路橋塗装・防食便覧, 丸善, 2005.12

(社)土木学会鋼構造委員会 歴史的鋼橋の補修・補強に関する調査小委員会 (2006): 歴史的鋼橋の補修・補強マニュアル, 土木学会, 2006.11