

サンドイッチ構造を用いた床版拡幅に関する基礎的研究

A fundamental study on bridge widening using a steel-concrete sandwich slab

篠原 晃*, 佐野 正**, 安東 祐樹***, 加藤 暢彦****

Akira Shinohara, Masashi Sano, Yuki Andoh, Nobuhiko Kato

*修士 (工学) ショーボンド建設㈱ 補修工学研究所 構造研究室 (〒305-0003 茨城県つくば市桜 1-17)

**博士 (工学) ショーボンド建設㈱ 補修工学研究所 構造研究室 (〒305-0003 茨城県つくば市桜 1-17)

*** ショーボンド建設㈱ 補修工学研究所 構造研究室 (〒305-0003 茨城県つくば市桜 1-17)

****博士 (工学) ショーボンド建設㈱ 事業本部 土木部 (〒136-0076 東京都江東区南砂 2-2-17)

Bridge width is increased by using more main girders or installing brackets on outside girders in numerous cases. Such large-scale bridge widening, however, involves high cost and a long period of traffic restrictions. Smaller scale bridge widening is likely to increase convenience for users on quite a few bridges. The authors proposed a method for widening bridges with a small width that uses the steel-concrete sandwich structure, and studied the basic characteristics of the method and its applicability to actual bridges. This paper describes the results of FEM analysis focused on the development length of top steel plate and of a fatigue test for slab specimens that was conducted while applying loads at two fixed points.

Key Word: steel-concrete sandwich structure, widening, development length, fixed-point fatigue test

キーワード: サンドイッチ構造, 拡幅, 定着長, 定点疲労試験

1. はじめに

幅員の狭い橋梁では, 大型車の対面交通が困難となること, 歩行者の安全性に支障を生じることなどの問題がある。これらの問題に対しては, 大型車の対面交通が可能となる幅員の確保や歩道の増設など, 利便性の向上を図る方法が実施され, その一例として床版の拡幅がある。

現在, 床版拡幅は, 主げたの増設や外げたにブラケットを設置する工法などが用いられている。しかし, 工事が大型化するため, 交通規制日数や工費の面での問題も多い。また, 既設床版および既設主げたの耐荷力面での問題もあり, 床版の全面的な打ち換えを伴う場合以外には積極的に実施されていないのが現状である。一方, 小規模な拡幅の適用により, 利便性の向上が可能となる橋梁も少なくない。

そこで筆者らは, 比較的小規模な橋梁拡幅を合理的に実施する工法の開発を目的として, けたの増設を行わずに床版を拡幅する新しい工法の検討を行った。

今回検討した拡幅工法は, 鋼板とコンクリートによって形成される鋼コンクリート合成床版^{1)~2)}を利用するもの(以下, 本工法をサンドイッチ拡幅工法と称する)である。本構造は, 上下に配置した鋼板を特殊ボルトで連結し, サンドイッチ化するもの(以下, サンドイッチ構

造と称する)である³⁾。このサンドイッチ構造は, 新設床版として適用できることは当然のことながら, 既設床版をそのまま上下鋼板でサンドイッチ構造とすることも可能であり, 既往の研究において高い剛性が確認されている^{4)~5)}。

床版拡幅に対する具体的な適用方法は, まず, 既設床版を上下鋼板と特殊ボルトを用いてサンドイッチ構造とし, 拡幅部は, その上下鋼板を延長してサンドイッチ構造を形成させるものである。そして, 拡幅部の上下鋼板と特殊ボルトで形成された鋼殻の中空部には高流動コンクリートを充填し, 合成床版とする。

このサンドイッチ拡幅工法の主な特長を列挙すれば以下の通りとなる。

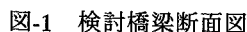
- (1) 鋼コンクリート合成床版であるため, RC構造と比較し, 軽量かつ高い耐力とじん性を有する。
- (2) 上下鋼板は特殊ボルトで連結しているため, 疲労破壊に対する懸念が少ない。
- (3) 上下鋼板と特殊ボルトで形成された鋼殻で自立する構造のため, 支保工が原則として不要である。
- (4) 既設部と拡幅部とが上下鋼板により一体化できる。
- (5) 既設床版を利用するため, 施工に際して建設廃材がほとんど発生しない。

本研究は, 幅員の狭い橋梁に対する小規模拡幅の方法

検討では、まず、上面鋼板の定着長に着目してFEMによる弾性解析を実施した。その後、サンドイッチ拡幅工法を適用した断面の変形やひずみ分布の状況を確認した。また、拡幅部をモデル化した実物大供試体を作製して2点載荷による定点疲労試験を行い、疲労耐久性を確認した。

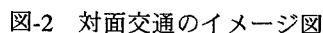
2.1 対象道路および橋梁

第3種5級に対応する橋梁の諸元は、昭和39年の道路橋示方書によれば設計荷重TL-14の橋梁となる。この構成を図示すると図-1のようになり、有効幅員は5.0mである。

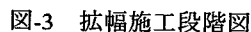


拡幅計画の概要を表-1 に示す。拡幅後の断面形状は平成 14 年の道路橋示方書に準拠しており、全幅員を 1.0m 拡幅した場合は有効幅員として 0.5m の拡幅量となり、図-2 に示すような大型車の対面交通が可能になると考えた。また、車輛の通行量を考慮して、A 活荷重で設計することとした。その場合、床版の補強が必要となることから、連続版支間部の下面には鋼板を接着し補強を行った。

道 路 の 規 格		車線	車線幅 (m)	路肩幅 (m)	有効幅員 (m)	地覆幅 (m)	全幅員 (m)	設計荷重
既設道路	第3種5級	1	4.0	0.5	5.0	0.35	5.7	TL-14
拡幅道路	2車線道路	2	2.75	0	5.5	0.6	6.7	A活荷重



本研究で採用したサンドイッチ構造は、上下の鋼板を特殊ボルトで連結させたものである。図-3に拡幅施工段階図を示す。



施工方法の概要を以下に述べる（図-4 参照）。

(1) 既設部（連続版および片持版）

既設部については、床版にφ65mmのコアを削孔し、そのコアに特殊ボルトを貫通させることによって上下鋼板を連結している。この特殊ボルトの設置間隔は300mmを基準とした。なお、上下鋼板とコンクリート床版の隙間（10mm）およびコア削孔部と特殊ボルトの隙間は、無収縮セメント系材料を充填している。

また、上鋼板定着部については、連続版の床版上面、特に上鋼板定着端部でひび割れの発生が懸念されることから、コンクリートの引張ひずみが0となる位置までの距離を越える長さを確保している。

(2) 拡幅部（片持版）

拡幅部については、既設部をサンドイッチした上下鋼板を延長して用いており、既設部と同様に特殊ボルトで連結している。また、上下鋼板と特殊ボルトで形成された鋼殻の中空部には高流動コンクリートを打設することによって、既設部との一体化を図っている。

なお、一般的な拡幅を行う場合、コンクリートアンカーや鉄筋の継手などの機械的定着によって、新旧コンクリートの一体化を確保する方法が多く用いられている。しかし、本研究で適用するサンドイッチ拡幅工法は、上下に配置された鋼板で既設部と拡幅部との一体化が図れるため、既設床版打継面はチッピングを行う程度の下地処理とした。

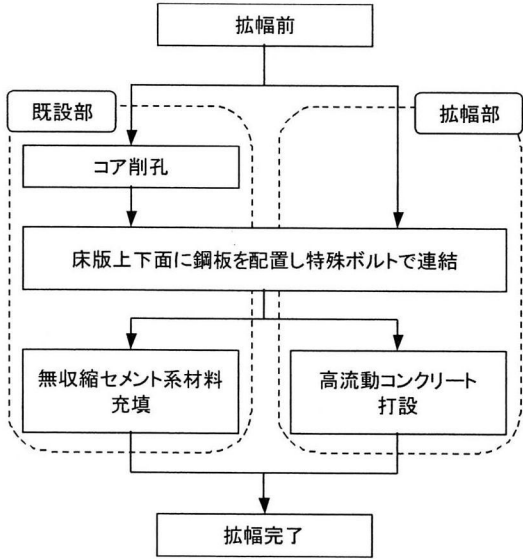


図-4 施工フロー

3. 構造解析

本章では、対象とする第3種5級道路の橋梁をサンドイッチ拡幅工法で500mm拡幅する場合について、上鋼板の定着長および解析モデルの変形状、ひずみ分布をFEM解析で検証する。

3.1 解析の概要

今回、片持版を拡幅することにより床版上面の引張応力が増加するため、ひび割れの発生が懸念された。そこで、必要な上鋼板の定着長を検証するため、FEMによる弾性解析を行った。定着長決定後、拡幅を行ったモデルの変形状、ひずみ分布を確認した。

3.2 解析モデル

解析のモデルは図-5に示すように、対象とする幅員断面の1/2とした。橋軸方向は3000mmとし、対称性を利用して橋軸方向断面の中心より1/2の1500mmの範囲をモデル化した。床版の上下面には鋼板を配置しており、サンドイッチ構造を形成している。解析に用いた材料物性は表-2に示すように、平成14年の道路橋示方書の規格値に準拠した。

表-2 材料物性値

材 料	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	備 考
コンクリート	2.35×10^5	0.2	$\sigma_c = 21\text{N/mm}^2$
鋼 板	2.0×10^5	0.3	SS400
鉄 筋	2.0×10^5	0.3	SD295

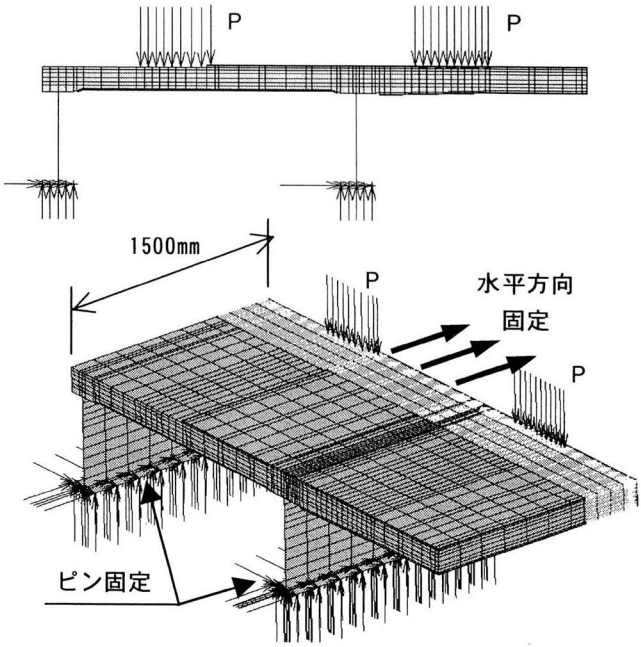


図-5 解析モデル（サンドイッチ構造適用後）

解析プログラムは汎用有限要素解析コード(MARC)を使用した。モデル要素は、床版部に8節点ソリッド要素、主げた部に4節点シェル要素を用いた。なお、鉄筋は4節点リバー要素で構成した。また、鋼材やコンクリート、主げたなど各部材間のすべりは考慮せずに剛結されているものとした。

拘束条件は、両主げたの下フランジ部をピン固定とした。また、橋軸方向の断面は、対称性を利用して載荷断面の水平方向を固定とした。

荷重条件は、実橋における輪荷重の載荷状態を考慮して2点載荷とした。載荷位置は、平成14年の道路橋示方書に準拠して、図-6に示すように、地覆幅600mm+250mmの位置と車軸幅1750mmを考慮した位置とした。載荷面は、輪帯を考慮して橋軸方向および橋軸直角方向にそれぞれ200mmおよび500mmとし、載荷荷重は、A活荷重(80kN)相当の等分布荷重(0.08N/mm²)を加えるものとした。

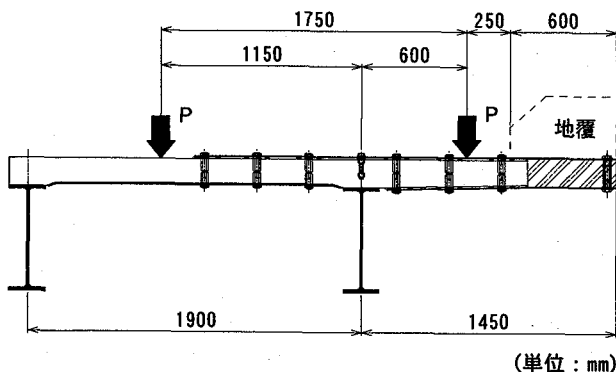


図-6 載荷位置

3.3 解析結果

(1)上鋼板定着長

上鋼板定着長の検討に際しては、図-5の解析モデルから上下鋼板および注入材を除いたRC床版の状態ではひずみ分布を確認した。図-7、8に床版上面に発生する載荷断面でのひずみ分布を示す。図より、引張ひずみが0となる位置は片持版側けた中心より880mmとなった。そこで、上鋼板の定着長は、コンクリートの引張ひずみが0となる位置までの距離を越える長さを確保することとした。その際、サンドイッチ構造の特殊ボルト設置間隔は300mmを標準としているため、今回のモデルでは、高力ボルト3本分に縁端距離を加えた955mmを上鋼板の定着長とした。

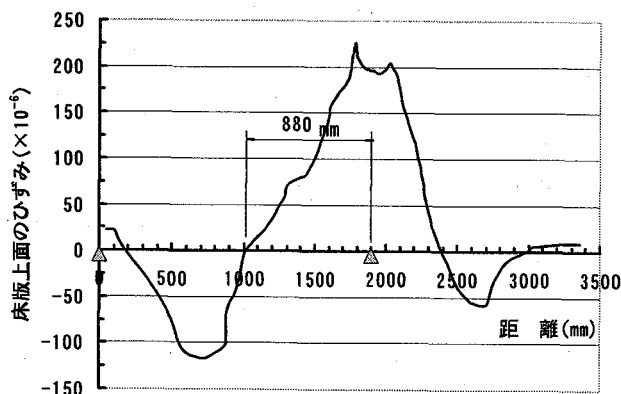


図-7 床版上面に発生するひずみ分布

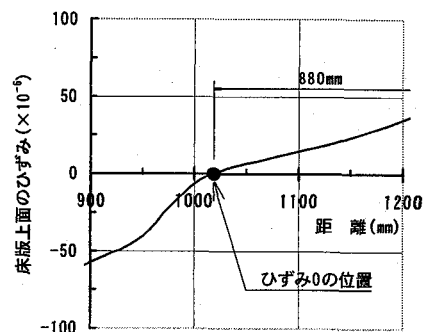


図-8 ひずみ分布 (ひずみ0の位置拡大)

(2)拡幅断面の解析

片持版側けた中心から955mmの定着長を有するモデルの解析結果を図-9、10に示す。図中の2つの曲線は、鋼板設置の有無によるひずみ分布状況を示している。

図-9より、鋼板有りの場合、鋼板無しの場合と比較して床版上面に発生する引張ひずみが低減されていることがわかる。コンクリートの引張ひずみが100(×10⁻⁶)程度でひび割れが発生すると仮定した場合、片持版側けた中心では、鋼板無しの場合、196(×10⁻⁶)の引張ひずみが発生しておりコンクリートのひび割れが懸念される。それに対し、鋼板有りの場合、81(×10⁻⁶)まで低減されておりコンクリートにひび割れは発生しないと考えられる。また、床版上面に鋼板を設置していない範囲(0~945mm)では、鋼板設置の有無に関わらず、床版上面のひずみが圧縮域となっていた。

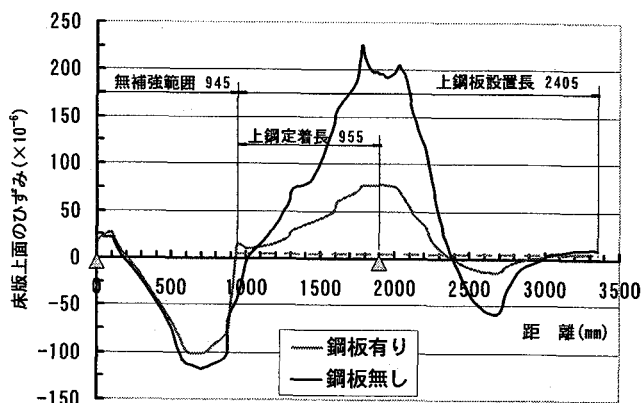


図-9 床版上面に発生するひずみ分布

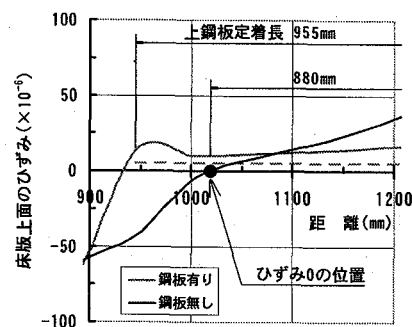


図-10 ひずみ分布 (鋼板端部近傍の拡大図)

次に、鋼板端部近傍を拡大した図-10 をみると、鋼板有りのひずみは、鋼板端部近傍でわずかであるが引張りひずみの増加が見られた。これは、鋼板が引っ張られることによって端部が上側に反ったためと考えられる⁷⁾。ただし、この位置でのコンクリートひずみはひび割れを発生させるようなひずみではなかった。

図-11 にサンドイッチ構造を適用した拡幅後の解析モデルの変形状況を示す。その結果、片持版先端のたわみが最大となり 0.64mm であった。

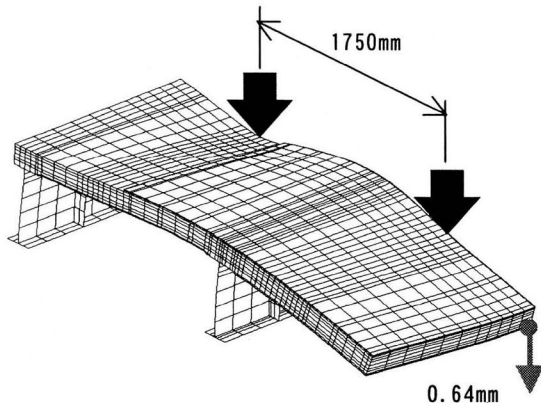


図-11 解析モデルの変形状況（模式図）

4. 載荷試験

本章では、前章で検討した解析結果を確認するため、その拡幅断面を有する実物大供試体を作製し、静的載荷試験を実施して変形性状およびひずみ分布について解析値との比較を行った。その後、この供試体を用いて定点点疲労試験を行い、疲労耐久性を検討した。

4.1 供試体

サンドイッチ拡幅工法を適用した後の供試体寸法および諸元を図-12、表-3 に示す。既設床版部の供試体諸元は、昭和39年の道路橋示方書で設計された2等橋タイプである。この供試体にサンドイッチ拡幅工法を適用して床版の拡幅を行った。

この供試体は、FEM解析と同様に幅員断面を 1/2 とし、橋軸方向に 3000mm、橋軸直角方向に 1500mm を有するけた付版供試体である。また、前章の解析結果に基づき、上鋼板の定着長は片持版側けた上から連続版側に 955mm とした。

表-3 供試体諸元

連続版	主鉄筋	圧縮：D16@300	引張：D16@150
	配力筋	圧縮：D10@550	引張：D10@275
	下鋼板	t=4.5 mm	
片持版	主鉄筋	圧縮：なし	引張：D16@300
	配力筋	圧縮：D10@550	引張：D10@275
	上鋼板	t=6.0 mm	
	下鋼板	t=4.5 mm	

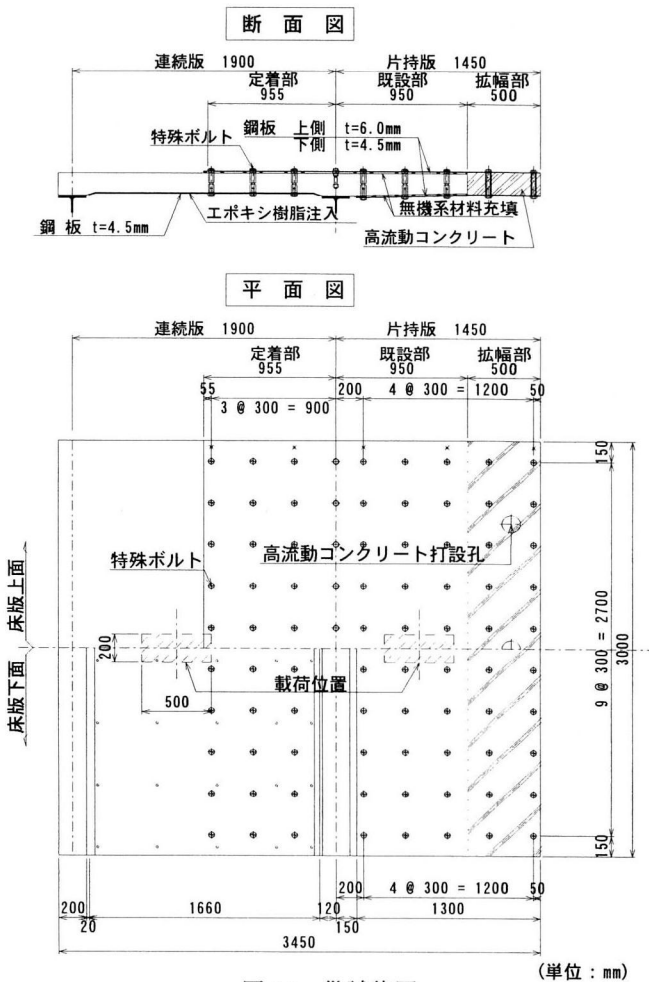


図-12 供試体図

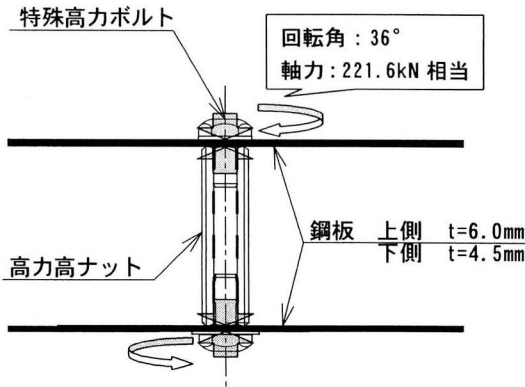


図-13 上下鋼板と特殊ボルトの連結

供試体に用いたコンクリートは、既設部および拡幅部ともに早強コンクリートとした。なお、拡幅部の上下鋼板で形成された鋼殻中には、高流動コンクリートを用いることを基本としているが³⁾、今回は、拡幅量が小規模なため、スランプ 18cm の早強コンクリートを用いた。

拡幅部および補強部の供試体作製に際しては、図-4 のフローに従って施工を行った。その際、既設床版のサンドイッチ構造となる部分の主鉄筋は、コア削孔に伴って全体の 1/2 が切断された。

M22 の特殊ボルトは、橋軸方向および橋軸直角方向に 300mm ピッチを基準として配置したが、長さ調整のために、けた上は橋軸直角方向に 200mm ピッチとした。また、図-13 に示すように、上下に配置された鋼板を特殊ボルトと高ナットを用いて回転角法（回転角：36°，軸力：221.6kN 相当）⁸⁾により締付けた。したがって、高ナットに軸力は導入されていない。

上下鋼板とコンクリート床版の隙間（10mm）およびコア削孔部と特殊ボルトの隙間には、無収縮セメント系材料を充填した。その後、拡幅部の鋼殻中に早強コンクリートを打設し、既設部と一体化させた。

4.2 使用材料

供試体と同一の条件のもとで養生を行った各材料試験結果を表-4～6 に示す。コンクリートおよび無収縮セメント系材料は定点疲労試験開始時に試験を行った。エポキシ樹脂は材齢 7 日で試験を行った。また、供試体の既設床版部に用いた異形鉄筋（SD295）およびサンドイッチ構造の上下鋼板に用いた鋼板（SS400）の引張試験結果を表-7 に示す。

表-4 コンクリートの材料試験結果

	既設部	拡幅部
圧縮強度(N/mm ²)	36.8	30.6
弾性係数(N/mm ²)	2.99×10 ⁴	2.77×10 ⁴
ポアソン比	0.19	0.20
引張割裂強度(N/mm ²)	2.4	2.2
材齢(日)	56	23

表-5 無収縮セメント系注入材の試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	材齢 (日)
76.0	2.1×10 ⁴	0.26	26

表-6 エポキシ樹脂の試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張せん断強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比 ⁷⁾
75.9	57.8	15.1	2260	0.38

表-7 鋼材の引張試験結果

	異形鉄筋(SD295)		鋼板(SS400)	
	D16	D10	6mm	4.5mm
降伏点 (N/mm ²)	358	357	272	244
引張強度 (N/mm ²)	535	499	441	338
弾性係数 (N/mm ²)	1.98×10 ⁵	1.95×10 ⁵	1.84×10 ⁵	1.92×10 ⁵

4.3 荷重試験の概要

写真-1 に試験状況を示す。試験は、2 点荷重による静的荷重試験および定点疲労試験を行った。静的荷重試験は、前章の FEM 解析の結果を検証するために行い、定点疲労試験は、版の疲労耐久性を検証するために行った。

試験機は、両試験とも 500kN 油圧サーボ式大型疲労試験機を用いた。荷重は、前章の解析時と同じく、地覆幅 600mm+250mm の位置と、車軸幅 1750mm を考慮した位置の 2 点荷重の方法を適用した（図-6 参照）。荷重板には橋軸方向 200mm、橋軸直角方向 500mm の鋼板を用いた。

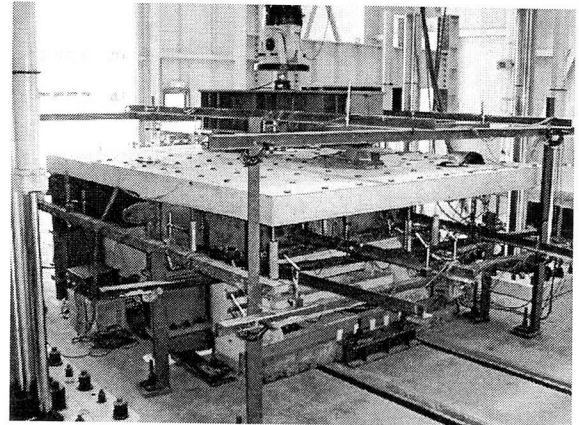


写真-1 試験状況

(1)静的荷重試験

試験は、A 活荷重相当（80kN）を 2 点荷重するものとした。測定項目は、床版のたわみ、鋼板のひずみ、主鉄筋のひずみとした。

なお、荷重時は荷重板の下にロードセルを設置しており、片持版側および連続版側において荷重が均等に荷重されていることを確認している。

(2)定点疲労試験

試験は、各荷重点における A 活荷重相当の合計 160kN を最大、2kN を最小とする荷重範囲で、繰返し速度 3Hz の正弦波形一定振幅により 200 万回の繰返し荷重を行うものとした。なお、疲労試験の途中に適宜、静的荷重試験を行い繰返し荷重による影響について検証するものとした。測定項目は、床版のたわみ、鋼板のひずみ、主鉄筋のひずみとした。

4.4 解析値と実験値の比較

定点疲労試験実施前に静的荷重試験を行い、FEM によって得られた解析値との比較を行った。図-14 に片持版先端および片持版側荷重点直下の比較を示す。図より、各荷重点に 80kN 荷重された場合のたわみは、解析値の方が 0.1mm 程度小さい値となったものの、ほぼ一致した傾向を示した。ただし、このたわみの差異の一因としては、鋼板とコンクリートの界面でのすべりが影響していると考えられる。解析モデルでは、鋼板とコンクリート

の界面でのすべりを考慮せずに剛結したが、実際には、鋼材とコンクリートの付着が小さいために界面ですれが生じたものと推察される。

供試体中央の荷重位置に着目した床版上面のひずみについて、解析値と実験値の比較を図-15に示す。図より、片持版側の支点中央近傍で解析値が実験値の1.6倍程度となっていた。ただし、その差異は $40(\times 10^{-6})$ 程度であり、全体的な分布傾向としては解析値とほぼ一致した。

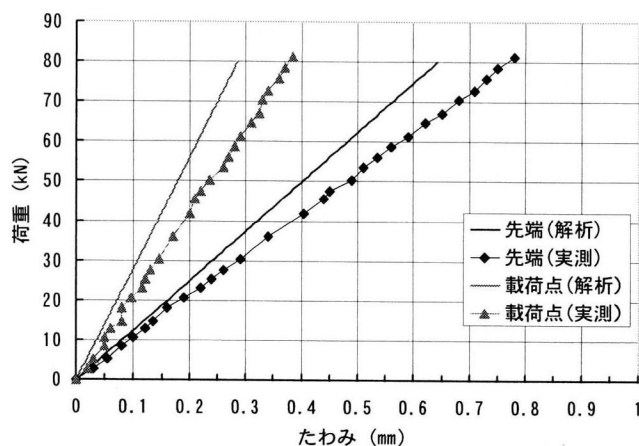


図-14 実験値と解析値の比較（たわみ）

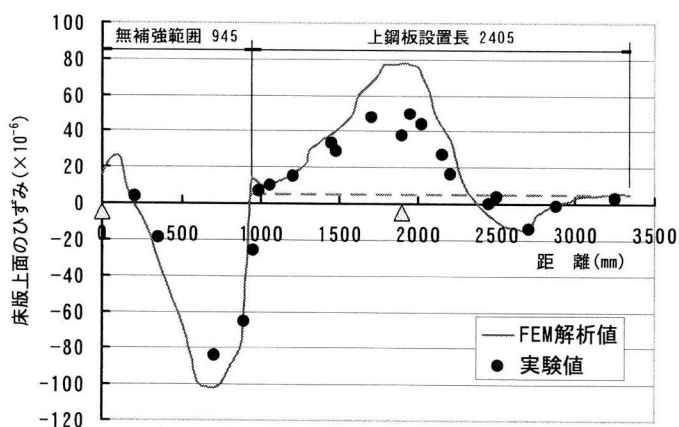


図-15 実験値と解析値の比較（ひずみ）

4.5 定点疲労試験の結果および考察

(1) 供試体の外観

200万回繰返し荷重後、供試体の外観上の変状を調べた。その結果、上鋼板定着端部および目視可能なコンクリート部分では、ひび割れが発生している箇所は見受けられなかった。

試験終了後にたたき点検を行った結果、鋼板にわずかな浮きの存在が確認されたものの、特殊ボルト近傍での浮きやゆるみなどの変状はなかった。

(2) 荷重とたわみの関係

図-16に片持版先端の荷重とたわみの関係を示す。図より、200万回載荷終了時の傾きにわずかな変化が見られたが、版の曲げ剛性の顕著な低下はないと考えられる。

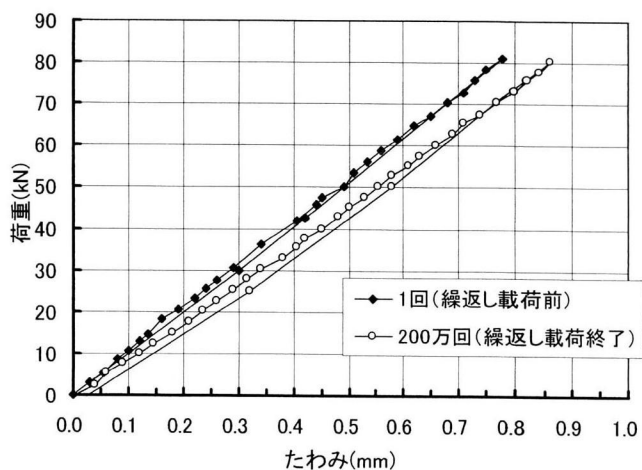


図-16 荷重とたわみの関係（片持版先端）

(3) たわみ分布

橋軸直角方向のたわみ分布を図-17に示す。載荷荷重は160kN ($80\text{kN} \times 2$)であり、測定断面は、橋軸方向の中心から300mm離れた地点である。図より、200万回載荷終了時のたわみ量に変化が見られるが、片持部先端の差は0.1mm程度であり、版の曲げ剛性の顕著な低下はないと考えられる。

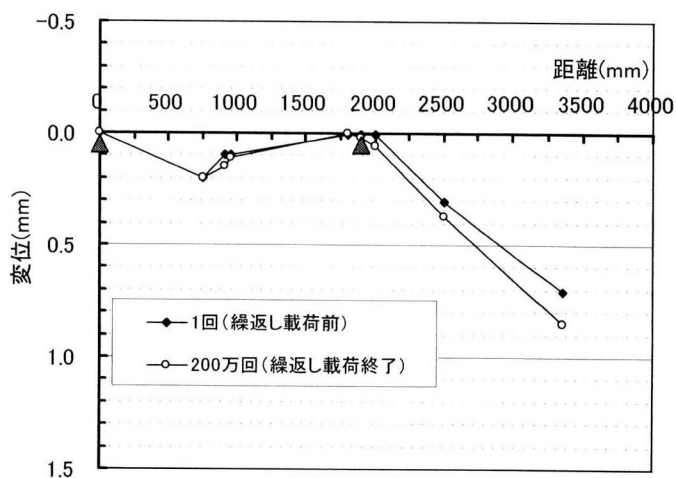


図-17 たわみ分布

(4) 照査断面の荷重とひずみの関係

片持版の照査位置は、平成14年の道路橋示方書に規定されており、片持版側のけた上フランジ中央からフランジ幅の1/2離れた位置である。その位置における橋軸直角方向断面での上鋼板および床版下面のコンクリートひずみについて、繰返し載荷前と200万回載荷終了後の比較を行った。荷重とひずみの関係を図-18, 19に示す。図より、上鋼板およびコンクリートのひずみはともに繰返し載荷前と200万回載荷終了後で変化がなく、供試体が健全であることが確認できた。

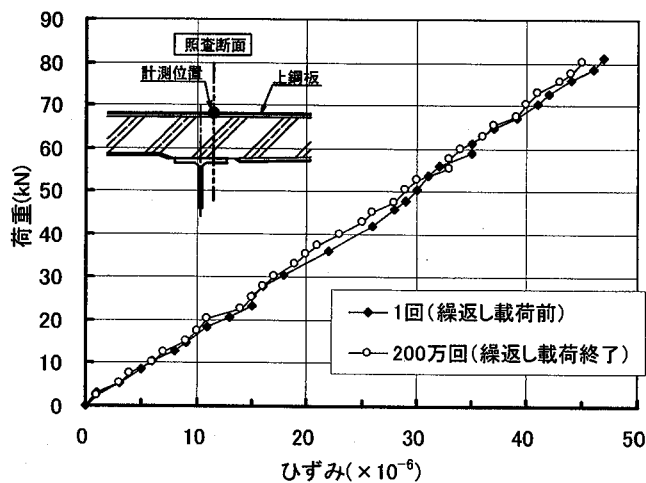


図-18 荷重とひずみの関係(鋼板)

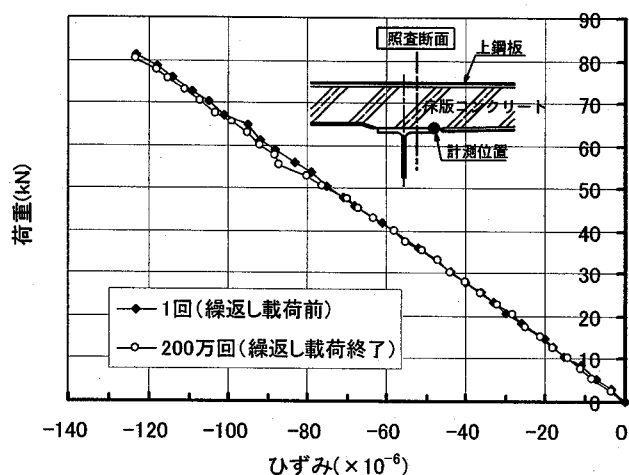


図-19 荷重とひずみの関係(コンクリート)

5. まとめ

本研究では、今回提案するサンドイッチ拡幅工法を用い、対象とする橋梁を500mm拡幅した場合について、解析的および実験的に検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 今回検討を行った上鋼板定着部では、定着端部でひび割れが発生することはなかった。
- (2) FEMの解析値と実験値は同様の傾向を示しており、解析によって、変形性状、ひずみ分布が概ね把握できることがわかった。
- (3) 200万回定点疲労試験終了後の供試体は健全であり、疲労耐久性についても問題ないことを確認した。

以上の結果より、本研究で適用したサンドイッチ拡幅工法は、小規模な拡幅の一手法として適用可能であることが確認できた。

今回は、サンドイッチ拡幅工法の基本的な性状および実橋への適用性を把握することを目的にしていたため、上鋼板の定着長に関しては、コンクリートの引張ひずみが0となる位置までの距離を越える長さを確保した。しかし、実際の施工を想定すれば、交通規制に制約がある場合も考えられることから、上鋼板の定着長を短縮することが必要となる。

また、本論では、1車線道路を有する比較的小規模な橋梁を対象としたため、拡幅量を500mmとした場合について検討を行ったが、より大きな拡幅量を求められる場合も想定される。その場合、対象とする橋梁の架設年次および要求される活荷重レベルによっては、主げたの補強も併せて検討する必要がある。

今後は、これら定着長の短縮や拡幅量の拡大に伴う諸問題について検討する必要があると考える。

参考文献

- 1) 松井繁之, 大田孝二, 西川和廣: 合成床版, 橋梁と基礎, 1998-12, pp. 41-47.
- 2) 上田多門, 塩屋俊幸: 鋼コンクリート系サンドウィッチ構造, コンクリート工学, 第30巻5号, pp. 5-20, 1992.
- 3) 佐藤昌志, 温泉重治: コスト縮減をした鋼合成コンクリートサンドイッチ床版の施工技術に関する開発, 橋梁&都市PROJECT, pp. 22-30, 1999.
- 4) 近藤悦郎, 池田憲二, 三田村浩, 温泉重治: 鋼合成サンドウィッチ床版を用いた合成桁の挙動について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第57号, I-43.
- 5) 近藤千秋, 佐々木康博, 小林将, 温泉重治: 損傷の著しいRC床版の鋼合成サンドイッチによる補強実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第54号, I-82.
- 6) 道路構造令の解説と運用, 日本道路協会, 昭和58年.
- 7) 佐野正, 三浦尚: 鋼板接着によるコンクリート部材の補強設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.550, V-33, pp. 117-129, 1996.
- 8) 加藤暢彦, 小野康文, 若菜和之, 城岡英敏, 平幸二: 高力ボルトの頭部を回して締付ける場合の軸力管理方法, 土木学会第56回年次学術講演会, I-B58, 2001.

(2002年9月13日受付)