

(8) 鋼コンクリートサンドイッチ構造の既設床版拡幅への適用に関する研究

Application of the Steel-concrete-steel Sandwich Structure to increase the Width of an Existing slab

安東 祐樹*, 佐野 正**, 篠原 晃***, 加藤 暢彦****
Akira Shinohara, Masashi Sano, Yuki Andoh, Nobuhiko Kato

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

***修士(工学) ショーボンド建設(株) 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(株) 東京支店 工事技術部 (〒136-0076 東京都江東区南砂 2-2-17)

Some of the existing bridges have suffered considerable deterioration of their convenience or safety because of small slab width. One of the conceivable solution is small-scale widening of the slab by applying the steel-concrete-steel sandwich structure to the existing slab. The authors have verified the fatigue endurance and load carrying capacity of slabs widened by such a method. There may be cases where the steel plates of the sandwich structure should sandwich the existing slab over a short length to minimize traffic restrictions for construction. In this study, the required overlap length of steel plate was investigated when the method was applied to existing slabs. As a result, the overlap length that was required for the method and could ensure safety was identified. This paper describes the applicability of the steel-concrete-steel sandwich structure for increasing the width of an existing slab based on the results of a fixed-point fatigue test under two-point loading.

Keywords: steel-concrete-steel sandwich structure, slab widening, overlap length of steel plate, two-point loading, fixed-point fatigue test

1. はじめに

既設橋梁の中には、床版の幅員が狭く利便性や安全性が大きく損なわれているものが存在する。この利便性や安全性の悪化は時として、交通渋滞や交通事故などの社会問題に発展していることが多い。これらの問題に対し、大型車の対面通行や歩道を確保するため、床版そのものを拡幅して利便性の向上を図っている例も見られる。

既往の床版拡幅では、ブラケットや主げたの増設により対応するのが一般的であるが、交通規制の長期化や工費の高騰を招き工事が大型化するなどの課題も多い。その結果、床版を全面的に打換える場合以外では、積極的に採用されていないのが実状である。

一方、小規模な拡幅により、利便性の向上が図れる橋梁も少なくない。その対策として、鋼コンクリートサンドイッチ構造を活用し、小規模な拡幅により利便性の向上を図る方法が考えられる。筆者らは、これまでに、この拡幅工法の疲労耐久性および耐荷性状の検討を行ってきた¹⁾。当初の検討では、片持版拡幅に伴い既設床版上面に発生する引張応力に抵抗できるよう十分な鋼板の定着長を有する構造としていた。しかし、交通規制の関係上、十分な車線を確保することが困難となり、施工範囲が限定される場合には、この定着長を短くしなければならない場合も想定される。

そこで、本工法の耐久性に影響を与えない定着長（以下、必要定着長）について検討を行なった。検討方法は、既設床版上面の引張応力が発生しない位置まで延伸した上鋼板定着長を段階的に短くした版供試体を作製し、その変形性状および疲労耐久性を確認するものである。

2. 設計概要

2.1 対象道路および橋梁

設計対象とした橋梁は、図-1 に示すような昭和 39 年鋼道路橋示方書に基づき TL-14 にて設計された有効幅員 5.0m の鋼道路橋である。

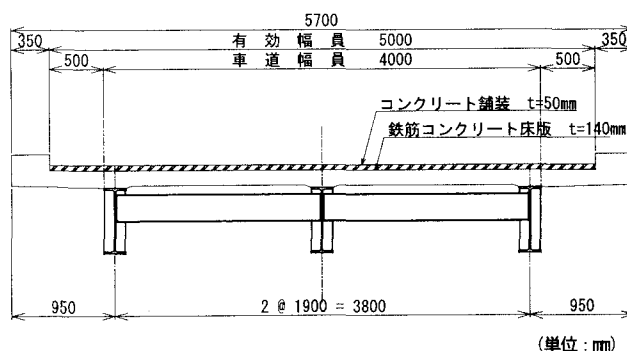


図-1 検討橋梁断面図

この橋梁は、道路構造令²⁾で規定される第3種5級道路に相当するもので、構造令上、車道のみで構成される道路である。この道路の大型車同士の対面交通は橋面上で不可能であるため、原則として待避所で行われる。そこで、この橋梁の利便性の向上を図るため、2車線化を行なうと想定した。

2.2 拡幅量の検討

第3種5級道路に必要な車道幅員は2.75mであるため、最小拡幅量で2車線化が可能となる車道幅員は、 $2.75(\text{m}) \times 2(\text{車線}) = 5.5(\text{m})$ 必要となり、不足分を拡幅により補うこととした。

拡幅計画の概要を表-1に示す。拡幅後の橋面寸法は、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、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、既設床版の補強が必要となり、連続版支間部の下面には鋼板を接着し補強を行った。

表-1 拡幅計画の概要

道路の規格	車線	車道幅員 (m)	路肩幅員 (m)	有効幅員 (m)	地盤幅員 (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	TL-14
拡幅道路	2車線道路	2	2.75	0	5.5	0.6	A活荷重

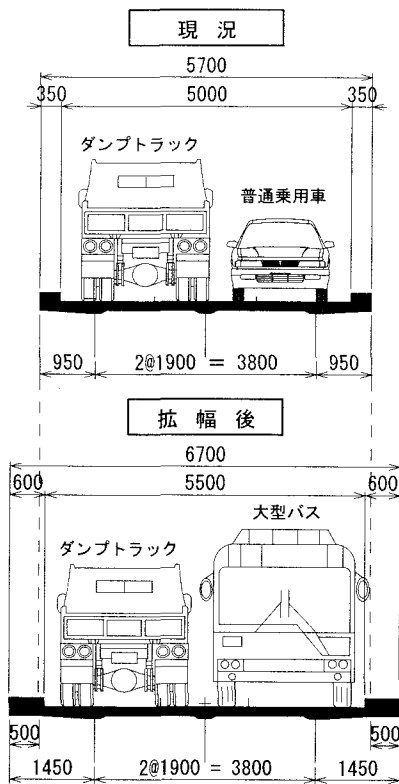


図-2 対面交通のイメージ図

(単位: mm)

2.3 拡幅の構造概要

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し鋼殻断面の内部に高流動コンクリートを打設して形成したものである。図-3に本構造を適用して拡幅を行なう際の施工概念図を示す。なお、施工方法の詳細については、文献⁹⁾を参考にされたい。

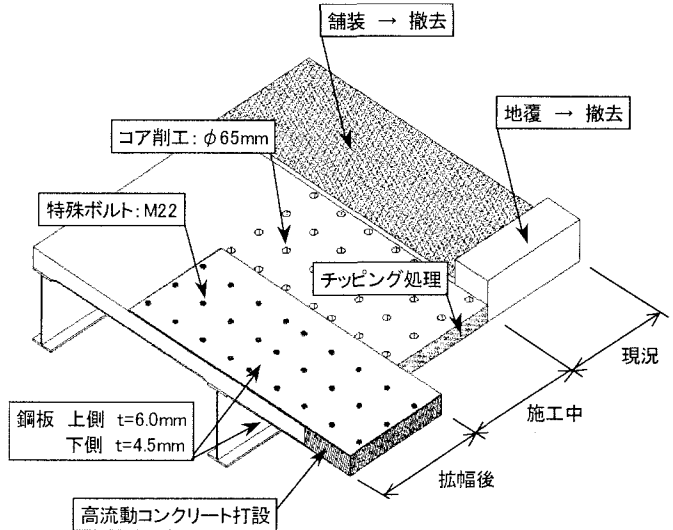


図-3 サンドイッチ拡幅工法施工概念図

2.4 連続版への上鋼板の必要定着長の検討

片持版の拡幅により、既設連続版の上面では引張応力が増加し、上鋼板定着端部でひび割れの発生が懸念される。そこで、上鋼板の定着長はコンクリートの引張応力が発生しない位置を越える長さ（以下、基準定着長）を標準としている。

しかし、本工法の場合、施工の都合上、橋面の終日片側交通規制を行なう必要があり、片側交互通行が可能となる車線を確保する必要がある。また、安全の観点からすれば長期の交通規制は好ましくなく、工期短縮を図るとともに極力施工範囲を狭くする必要がある。そこで、基準定着長を確保した供試体に対し、図-4に示すように上鋼板定着長を特殊ボルト1列分（300mm）ずつ短くしていった場合の変形性状および疲労耐久性の検討を行なった。

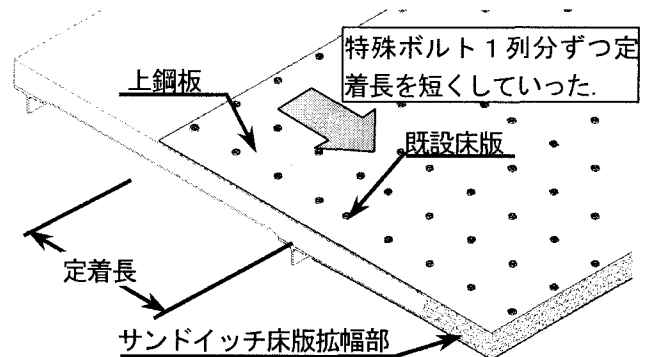


図-4 必要定着長の検討概念図

3. 構造解析

本章では、交通規制の関係上、上鋼板を短くする場合の影響について、FEMによる線形解析を行った結果を述べる。

3.1 解析の概要

解析は、基準定着長を有するモデルに対し、上鋼板定着長を特殊ボルト1列分ずつ短くして行った場合の変形状、ひずみ分布を確認するものである。

3.2 解析モデル

解析モデルは、図-5に示すように対象とする橋梁の幅員断面方向の1/2とし、橋軸方向は3000mmとした供試体をモデル化した。なお、モデル化の範囲は、供試体の対称性を利用して橋軸方向断面の中心より1/2の1500mmとした。また、既設床版部の鉄筋およびサンドイッチ構造部の鋼板に用いた諸元は、表-2に示すとおりである。さらに、材料物性は平成14年道路橋示方書の規格値に準拠して表-3に示すような物性を用いた。

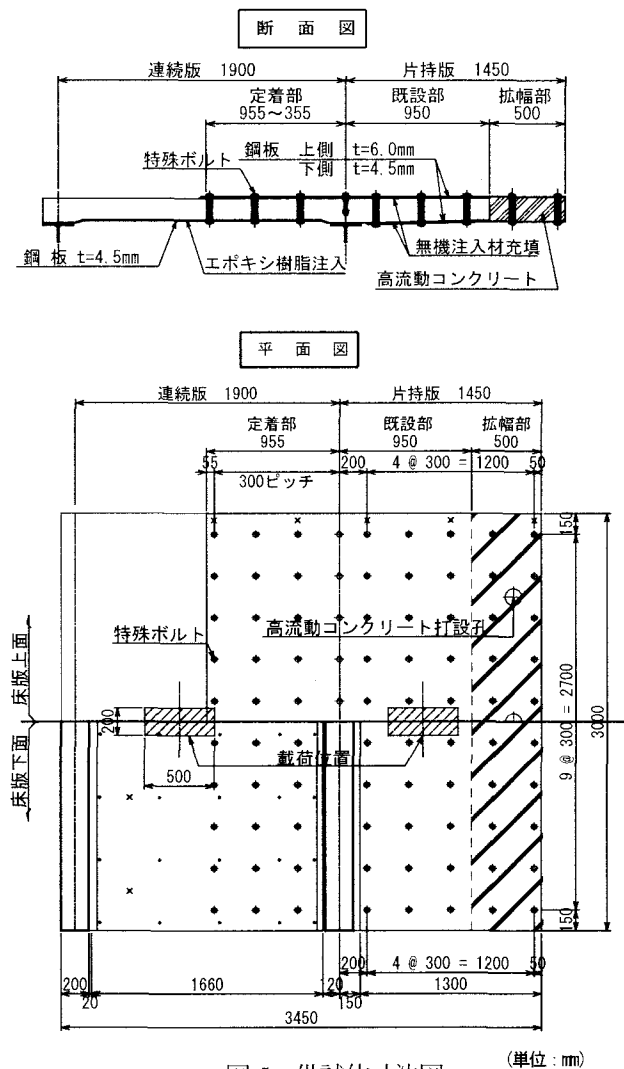


図-5 供試体寸法図

(単位: mm)

表-2 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	

表-3 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

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、対称性を利用して荷重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荷重状態を考慮して2点荷重とした。荷重位置は、平成14年道路橋示方書に準拠して、図-6に示すように、片持版先端より850mmの位置と、その位置から車軸幅1750mm離れた位置とした。また、荷重面は、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、荷重荷重は、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。

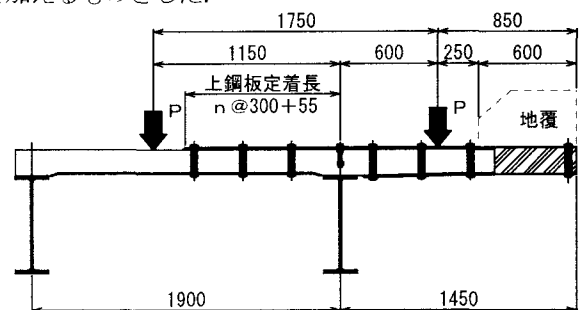


図-6 荷重荷重位置

解析は、以下の2種類について行なった。

- ① コンクリートの引張ひずみが発生しない位置以上に定着長を延伸したもの(基準定着長)。
- ② 基準定着長から引張ひずみがコンクリートにひび割れを発生するひずみ(100~120(×10⁻⁶)と仮定)になる長さまで特殊ボルト1列分ずつ短くしたもの(必要定着長)。

3.3 解析結果

(1) 基準定着長

基準定着長の算出は、想定拡幅断面をすべてRC構造とした場合のひずみ分布により求めた。このときの上面の引張ひずみが発生しない位置は、図-7に示すように片持版側の主げた中心より880mmの位置となった。

そこで、サンドイッチ構造の特殊ボルト設置間隔が300mmを標準としているため、上鋼板の定着長は、特殊ボルト3本分に縁端距離を加えた955mmを基準定着長とした。RC構造の場合、 $196(\times 10^{-6})$ のひずみが片持版側の主げた中心で発生していた。これに対し、この定着長を有するサンドイッチ構造を適用して解析を行った場合、同位置のコンクリートひずみが $64(\times 10^{-6})$ まで低減される結果となった。

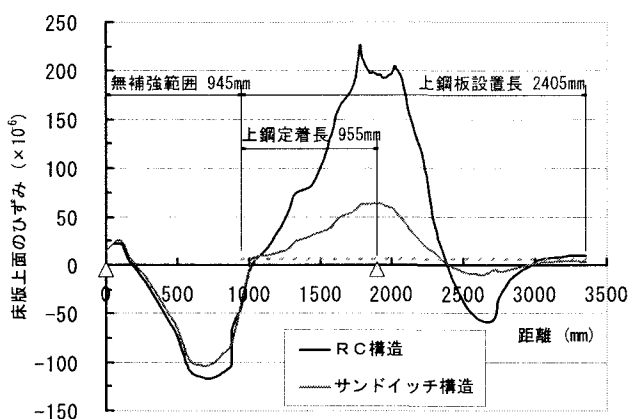


図-7 床版上面のコンクリートひずみ分布
(基準定着長)

(2) 必要定着長

必要定着長の決定は、基準定着長を有するモデルから、特殊ボルト1列分(300mm)ずつ短くして解析を行い、必要な定着長を決定した。

① 上鋼板定着長 655 mmの場合

上鋼板定着長 655 mmの解析結果を図-8に示す。図より、上鋼板定着端部近傍で上縁のひずみが突出する箇所が見られた。しかし、そのひずみは、 $45(\times 10^{-6})$ 程度であり、ひび割れの発生の懸念はないと考える。

② 上鋼板定着長 355 mm

上鋼板定着長 355 mmの解析結果を図-9に示す。図より、上鋼板定着端部近傍でのひずみが、特殊ボルト1列分定着長を短くした場合より顕著に突出する傾向が見られた。このときのひずみは、 $103(\times 10^{-6})$ となり、ひび割れの発生するひずみを考慮すると、ひび割れの発生が懸念される。しかし、解析結果からは、ひずみ分布は連続しており、ひび割れの発生は確認されなかった。これらより、短期的な荷重に対しては問題無いとしても、断面急変によりひずみが突出しているため、長期の疲労耐久性に懸念が残る。

③ 上鋼板定着長 55 mm

上鋼板定着長 55 mmの解析結果を図-10に示す。図より、片持版側主げたから 300 mmの位置までのひずみが突出し、ひび割れの発生していると考えられる。このときのひび割れ発生図を図-11, 12に示す。図より、片持版側主げた上でひび割れが発生しているのが確認できる。このひび割れの範囲は、モデルの橋軸方向全体におよんでおり、上鋼板の定着長として成立しないと判断される。

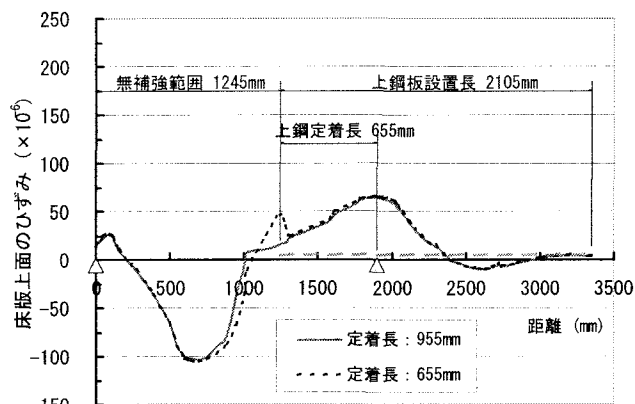


図-8 床版上面のコンクリートひずみ分布
(定着長 655 mm)

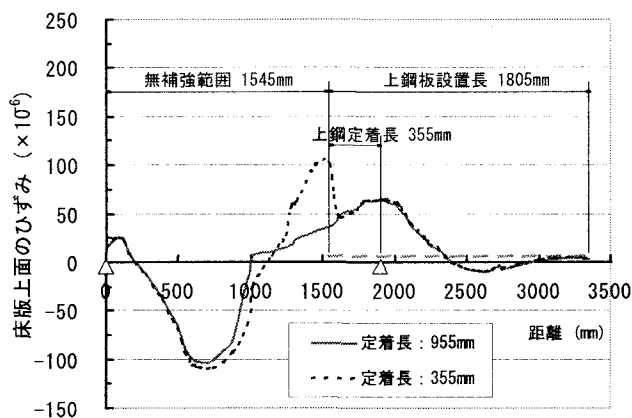


図-9 床版上面のコンクリートひずみ分布
(定着長 355 mm)

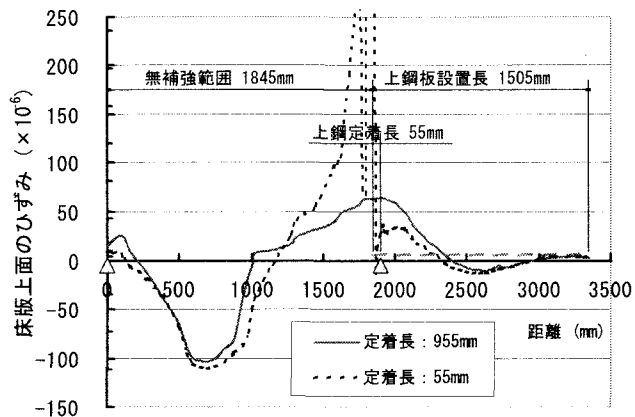


図-10 床版上面のコンクリートひずみ分布
(定着長 55 mm)

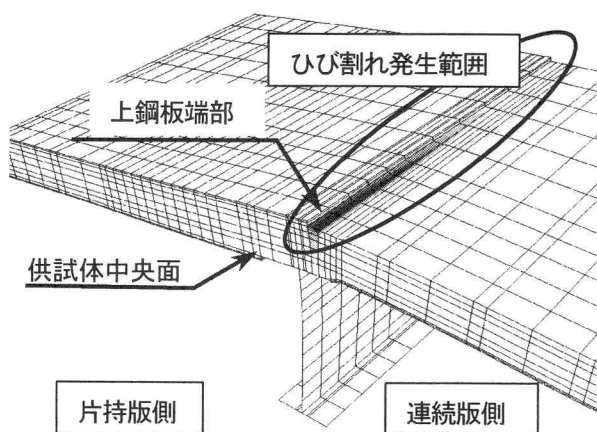


図-11 モデルのひび割れ分布図（主げた上近傍）

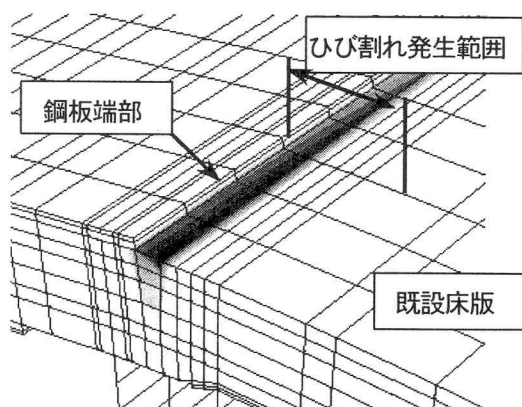


図-12 モデルのひび割れ分布図（ひび割れ部拡大）

解析結果より，上鋼板の定着長を片持板側の主げた上とした場合には，ひび割れが発生する結果となった。よって，必要定着長は，片持版側の主げた中心より特殊ボルト1列分の355mmが必要であると判断される。

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，上鋼板定着長を短くしていった場合の静的載荷試験および定点疲労試験を行い，変形性状および疲労耐久性について確認を行なった。

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は，前章の図-5，表-2に示すものを作製した。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，解析と同様に橋軸方向に3000mm，橋軸直角方向に3400mmを有するけた付版供試体とした。なお，前章の解析結果に基づき，上鋼板の定着長は基準定着長955mmのものから，特殊ボルト1列分ずつ短くして各試験を行い，最小355mmとなる長さまで試験を実施した。

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4～7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。

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 ν
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 載荷試験の概要

写真-1に試験状況を示す。試験は，2点載荷による静的載荷試験および定点疲労試験を行った。

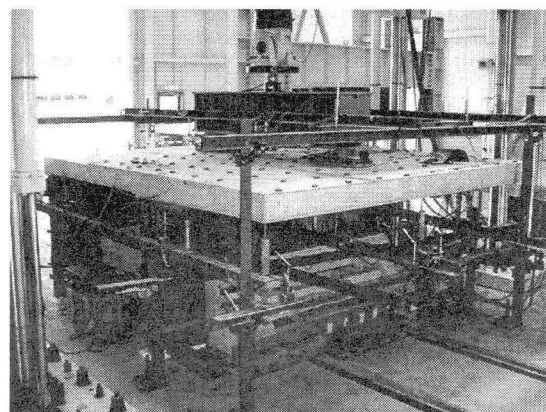


写真-1 試験状況

静的載荷試験は、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。載荷は、前章の解析時と同じく、片持版先端より850mmの位置と、車軸幅1750mm離れた位置の2点載荷とした(図-6参照)。載荷板は橋軸方向200mm、橋軸直角方向500mmの鋼板を用いた。

(1)静的載荷試験

試験は、A活荷重相当(80kN)を2点載荷するものとした。測定項目は、床版のたわみ、コンクリートのひずみ、鋼板のひずみ、主鉄筋のひずみとした。

なお、載荷時は載荷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載荷されていることを確認している。

(2)定点疲労試験

試験は、各載荷点における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200万回の繰返し載荷を行なうものとした。なお、疲労試験の途中に適宜、静的載荷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、コンクリートのひずみ、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載荷試験を行い、各定着長における耐荷性状を解析結果と比較を行った。各定着長における床版上面のひずみ分布を以下に示す。なお、ひずみは、無補強部ではコンクリートのひずみを補強部では鋼板のひずみを測定している。

① 基準定着長(955mm)

基準定着長では、図-13に示すように片持版側の主げた上近傍で実験値が解析値の2/3程度であった。ただし、全体の分布傾向としては実験値と同様であり、また、ひび割れ発生ひずみより小さいことからひび割れは発生しないと考える。

② 上鋼板定着長(655mm)

定着長655mmを有する供試体のひずみ分布は、図-14に示すような結果となった。図より、解析では定着部端部のコンクリート引張ひずみが $45(\times 10^{-6})$ となったのに対し、実験値では $31(\times 10^{-6})$ となりおよそ2/3倍であり、ひび割れは発生しないと考える。

③ 上鋼板定着長(355mm)

定着長355mmを有する供試体のひずみ分布は、図-15に示す結果となった。図より、全体のひずみ分布は実験値と解析値とはよく一致する。しかし、上鋼板端部付近のコンクリート引張ひずみが、解析値 $103(\times 10^{-6})$ に対し、実験値 $123(\times 10^{-6})$ と解析値を上回る結果となった。

これにより供試体にひび割れの発生が懸念されたが、静的試験終了後、外観を調べたが変状は確認されなかった。

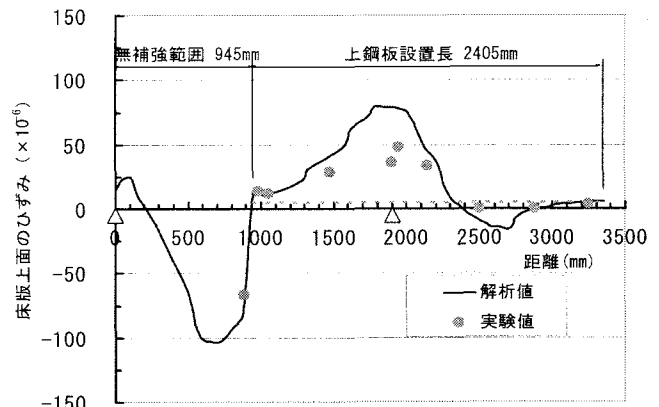


図-13 床版上面のひずみ分布(基準定着長)

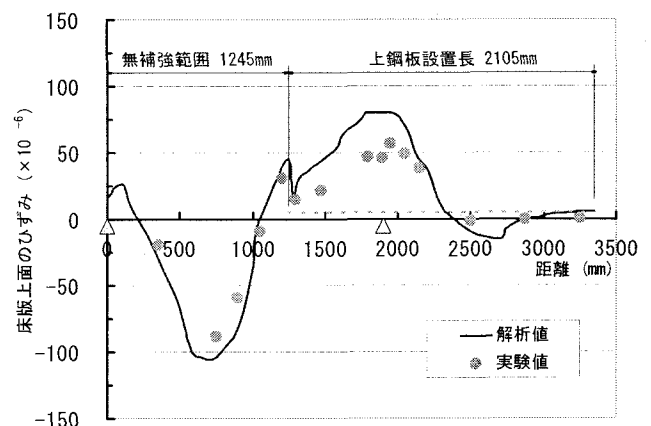


図-14 床版上面のひずみ分布(定着長655mm)

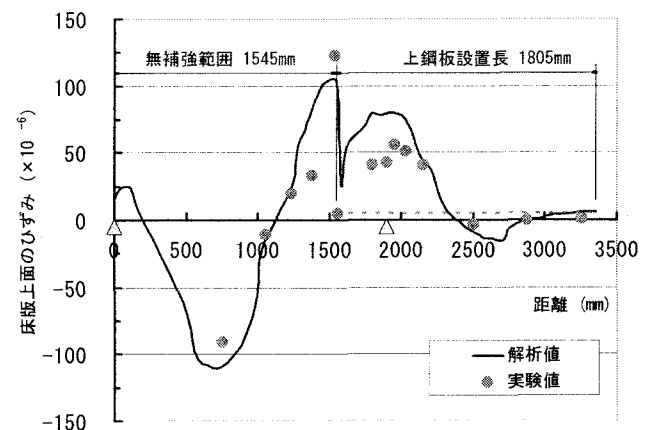


図-15 床版上面のひずみ分布(定着長355mm)

以上の結果より、片持版側主桁中心からの定着長さが355mmとした場合、静的試験終了後に供試体にひび割れは確認されなかったが、すでにひび割れが発生するひずみを超過しており、定点疲労試験を行った場合には、疲労耐久性が確保できないと考えられる。

なお、実験値と解析値のひずみ分布に相違が見られたのは、今回解析モデルが、鋼材やコンクリートなどの各部材間のすべりを考慮しなかった影響であると推察される。

4.5 定点疲労試験の結果

各定着長を有する供試体に対し、静的载荷試験の後に、供試体の疲労耐久性を評価するため、定点疲労試験を実施した。その結果を以下に記す。

① 基準定着長(955 mm)

基準定着長を有する供試体に対し定点疲労試験を行った結果を図-16 に示す。図より、試験開始前後の荷重とたわみの関係は、両者ともほぼ線形を保っており、ひび割れ等の発生は無いと判断される。

ここで、試験開始前後では、片持版先端のたわみに 0.08 mm 程度、終了時の方が大きくなる結果となった。

しかし、その差はわずかであることや、図-17 に示すように片持版付け根部上面のひずみに変化がないことを考えると疲労耐久性について問題無いと考えられる。

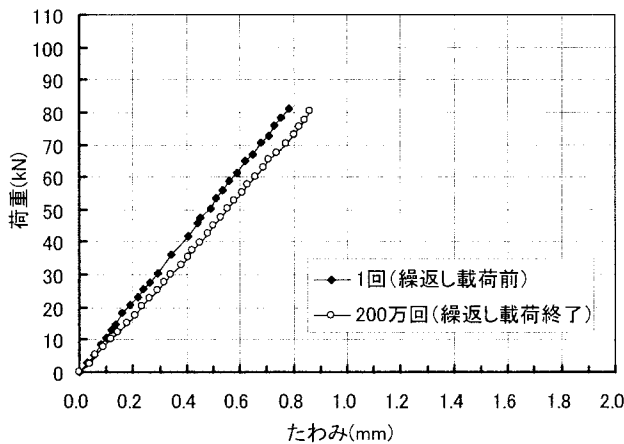


図-16 片持板先端の荷重とたわみの関係

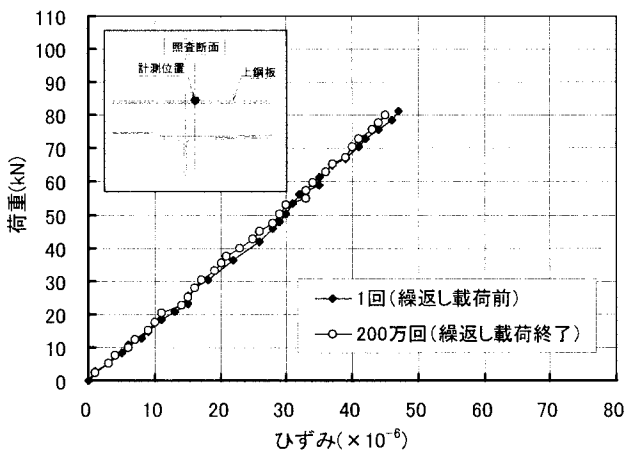


図-17 照査断面位置の荷重とたわみの関係

② 上鋼板定着長(655 mm)

定着長 655 mm を有する供試体に対し定点疲労試験を行った結果を図-18 に示す。図より、試験開始前後では、たわみにほとんど変化が無く、ほぼ線形であった。

ただし、試験終了時にはたわみが減少する特異な傾向が見られたが、たわみ差はわずかであるため、問題無いと判断する。

ここで、図-19 に示すように、照査断面位置のひずみに変化がないことより、疲労耐久性について問題無いと

考えられる。

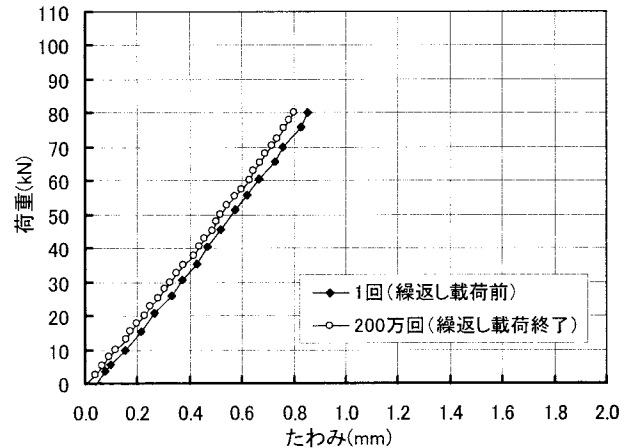


図-18 片持板先端の荷重とたわみの関係

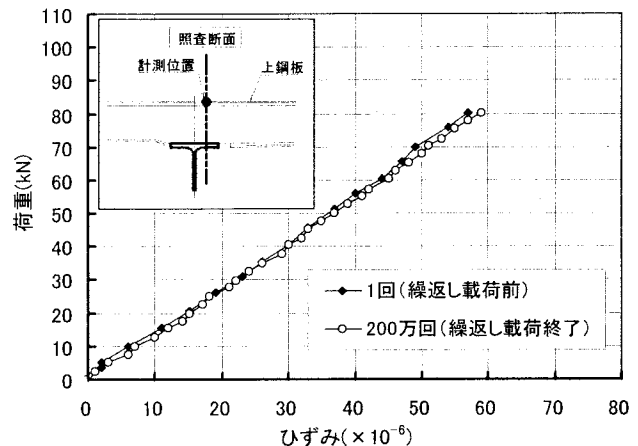


図-19 照査断面位置の荷重とひずみの関係

③ 上鋼板定着長(355 mm)

定着長 355 mm を有する供試体に対し定点疲労試験を行った結果を図-20 に示す。図より、試験開始からたわみに変化が見られ、载荷回数 10 万回で、初期载荷時のおよそ 1.3 倍の 1.44 mm となった。その後、繰返し载荷を行なうにしたがいたわみが漸増し、最終的に 40 万回で試験を終了した。

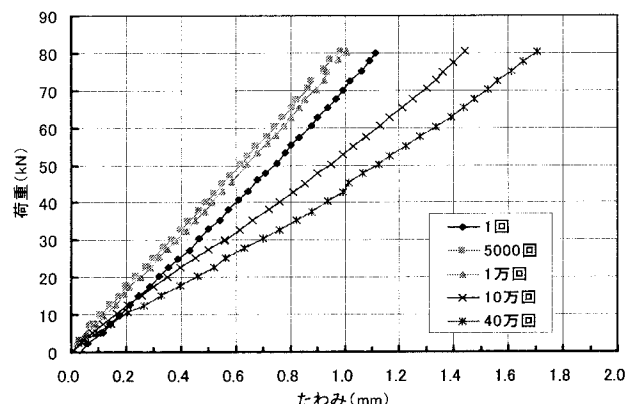


図-20 片持板先端の荷重とたわみの関係

ここで、片持版付け根部の上鋼板のひずみを図-21 に示す。図より、载荷回数 5000 回から 1 万回までは、初期

荷重時のひずみに差はほとんど無く、10 万回以降では、引張ひずみが $10(\times 10^{-6})$ ほど減少する傾向がみられた。しかし、ひずみの急変は見られない。

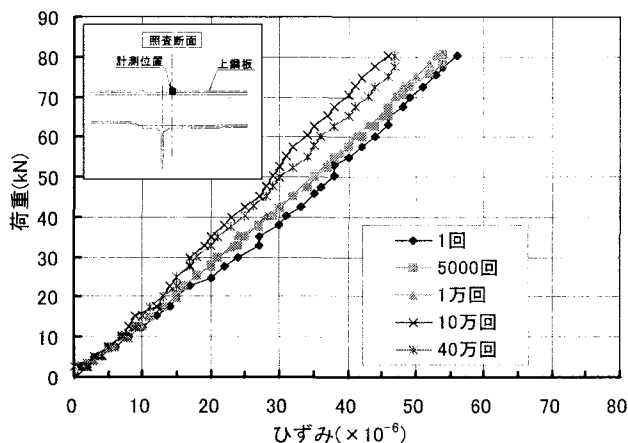


図-21 照査断面位置の荷重とひずみの関係

そこで、上鋼板端部近傍のコンクリートのひずみに着目した。その結果を図-22 に示す。図より、荷重回数 5000 回では、初期と比べ $20(\times 10^{-6})$ 低下し、繰返し荷重を行なうにしたがいひずみは減少し、終了時には初期値に対しおよそ $80(\times 10^{-6})$ のひずみが低下した。これは、上鋼板定着部端部のひずみゲージ近傍でひび割れが発生したためであると考えられる。以上より、定着端部でのひび割れの発生は、定点疲労試験開始の初期段階で発生していたものと考えられる。

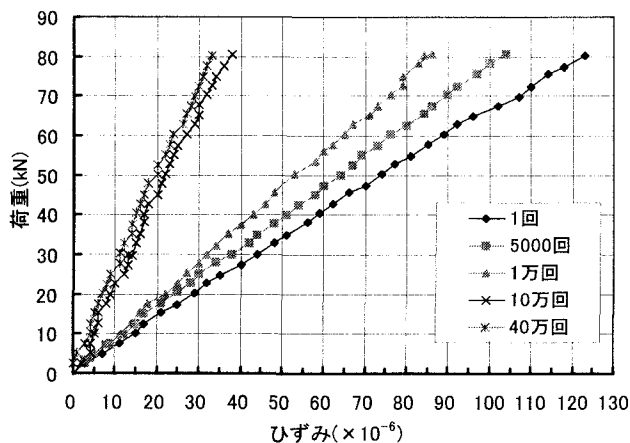


図-22 上鋼板定着端部の荷重とひずみの関係

ここで、定着長 355 mm の試験終了時に定着部の鋼板を取り除いた時の注入材およびコンクリート表面の状態は、コンクリート躯体までひび割れが発生していた。これまでの定着長の場合では、注入材にひび割れの発生が確認された場合もあったが、注入材を撤去した際にはコンクリートにひび割れの発生は確認されなかった。

以上より、上鋼板定着長が特殊ボルト 1 列分の 355 mm の場合では、拡幅後断面の疲労耐久性を確保できない結果となり、最低特殊ボルト 2 列分の長さ 655 mm は定着長として必要であると判断される。

5. まとめ

本研究では、サンドイッチ拡幅工法により有効幅員を 500mm 拡幅した床版に必要な定着長について、解析および実験により検討を行なった。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の中で、基準定着長および特殊ボルト 1 列分短くした定着長 655 mm を有する場合には、定着部端部でひび割れが発生することはなかった。
- (2) 上鋼板定着長 355 mm の場合、定点疲労荷重試験直後に発生したと思われるひび割れの発生により版の剛性が低下し、疲労耐久性を確保できなかった。
- (3) 今回想定した橋梁の床版にサンドイッチ拡幅工法を適用し有効幅員を 500 mm 拡幅する場合、最低特殊ボルト 2 列分の定着長 (655 mm) を確保すれば、疲労耐久性に問題ないことが確認できた。
- (4) 解析値と実験値では、定着端部のひずみが問題になるが、全体のひずみ分布としてはほぼ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。
- (5) 定着長を短くした場合、鋼材とコンクリートのすべりの影響が顕著となるため、解析ではこの影響を加味する必要がある。

6. 今後の課題

今回、合成構造の一種であるサンドイッチ構造を活用して、小規模な床版の拡幅を行なう工法の必要定着長について検討を行った。しかし、この技術を活用するためには、依然残された課題もある。そこで、今後検討すべき課題について以下に記す。

- (1) 解析値と実験値の相違があったことから、鋼とコンクリートのすべりの影響が大きいため、解析上でもその影響を加味する必要がある。
- (2) より大きな拡幅量を求められる場合では、鋼材とコンクリートのすべりが耐荷力や耐久性に影響を及ぼす度合いがさらに増すため、拡幅量に応じた定量化が必要である。
- (3) 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、これらの問題について検討を行っていく考えである。

参考文献

- 1) 篠原晃, 佐野正, 安東祐樹, 加藤暢彦: 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, 構造工学論文集 Vol.49A pp1127-pp1134, 2003.
- 2) 道路構造令の解説と運用, 日本道路協会, 1983.