

論文 接着剤を用いた合成床版の底鋼板剥離に関する実験的検討

三村 陽一^{*1}・吉武 勇^{*2}・小川 淳史^{*3}・和多田 康男^{*4}

要旨：本論文では、接着機能を有する無機系防錆剤を用いた合成床版の基礎実験として、はり要素の曲げ実験を行い、底鋼板とコンクリートの剥離に対する横リブや接着剤の効果を報告する。曲げ実験の結果、底鋼板に塗布した接着剤や横リブ単体では、十分な剥離防止効果を発揮できないが、両者を複合して用いた供試体の曲げ実験では、コンクリートの上縁が圧縮破壊に至るまで、底鋼板とコンクリートはほぼ完全合成の挙動を示した。また、ひずみ分布が最大荷重に至るまではほぼ直線状となり、平面保持則が成り立ったことから、曲げ荷重を受ける一般的な鉄筋コンクリートと同様に設計できるものと推察された。

キーワード：鋼・コンクリート合成床版, 接着剤, 横リブ, ひずみ分布, 曲げ実験

1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版(以下、合成床版と略記)は、コンクリートの補強材と型枠を兼ねた底鋼板を、ずれ止めによりコンクリートと一体化させた床版形式である。一般にずれ止めは機械的な作用によるものであり、たとえばスタッドジベルや孔あき鋼板リブなどが実用化されており、様々な構造が研究・開発されている^{1)~4)}。これらに対し本研究では、機械的ずれ止め替わるものとして、接着機能を有する無機系防錆剤(以下、接着剤と略記)を用いた合成床版の開発を行っている。本研究で用いる接着剤は、高い防錆機能だけでなく、予め接着剤を塗布し乾燥させた鋼板上にフレッシュコンクリートを打設すると、硬化に至る過程で接着効果を発揮する特徴も有している。この接着剤がずれ止めとして十分に機能すれば、合成床版の構造を簡素化でき、これによって施工性の向上(たとえばコンクリートの充填性の改善)や合成床版の軽量化やコスト縮減などを図ることができる。接着剤の材料特性の詳細については既報⁵⁾を参照されたい。

著者らはこれまで、機械的ずれ止めを設置せず、接着剤のみで鋼・コンクリートを一体化させた合成はりを用いた曲げ実験を行ってきた⁵⁾。その結果、コンクリートにひび割れが生じるまでの荷重レベルをみると、接着剤のみで作製した合成はりの構造性能は、機械的ずれ止め(スタッドジベル)を用いた合成はりと同様であった。しかしながら、コンクリートのひび割れ発生と同時にコンクリートから底鋼板が剥離し、合成はりが破壊した。このことから、接着剤のみで合成構造とすることは困難であり、底鋼板の剥離防止構造が必要であることが確認できた。しかしながら、剥離防止のためにスタッドジベル等の機械的ずれ止めを設けることは、合成構造の簡素化

に対する接着剤活用の利点を損ねることとなる。

すでに実用化されている合成床版の底鋼板には、横リブが設置される場合が多い。これらの横リブは、コンクリート打設時における底鋼板の剛性確保のための補強材としてのみ機能するものや、孔あき鋼板を用いることでずれ止めとしても機能するものなどがある。本研究で開発する接着剤を用いた合成床版においても、横リブが必須であり、それがずれ止め効果を付与する可能性がある。そこで本研究では、底鋼板の剥離に対する接着剤や横リブの機能を調べるため、合成はりを用いた曲げ実験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

本研究では、支間長 4m 程度の合成床版を参考に、1/2 スケールの供試体を作製し、これらを曲げ実験に供した。本研究で用いた供試体を図-1 に示す。本研究の曲げ実験では、スパン中央付近に曲げひび割れが発生し、これに起因して底鋼板が剥離すると予想される。このような底鋼板の剥離に対する横リブの効果を調べるため、図-1(a)に示すように、Type H 供試体にはスパン中央から 400mm までの範囲に横リブを設けていない。また、Type H 供試体は接着剤塗布箇所異なる 3 種類とし、接着剤の効果も調べた。本研究で用いた接着剤の各特性値を表-1 に示す。また、接着剤の塗布箇所および接着剤の平均塗布厚を表-2 に示す。Type H 供試体に加えて、圧縮鉄筋を配するなど、実構造を模擬した Type F 供試体も作製し、これを用いた曲げ実験も行った。なお、各条件における供試体は 2 体ずつとした。

本研究で用いたコンクリートの配合を表-3 に示す。

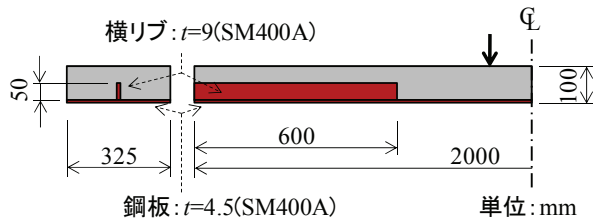
表-3 に示すように、合成床版用コンクリートとして一

*1 呉工業高等専門学校 環境都市工学科助教 博(工) (正会員)

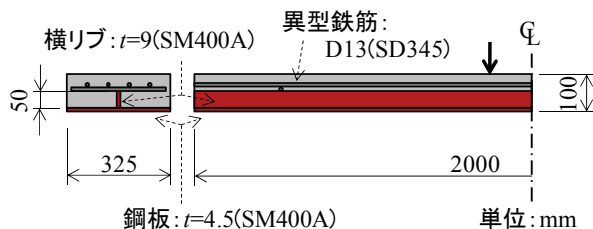
*2 山口大学大学院 理工学研究科准教授 博(工) (正会員)

*3 宇部興産機械(株) 橋梁鉄構部 修(工)

*4 宇部興産機械(株) 橋梁鉄構部部長 博(工)



(a) Type H (H-N, H-S, H-SR)



(b) Type F (F-SR)

図-1 供試体

表-1 接着剤各特性値

<粉末>		250mm	
ホワイトセメント	重量比 36%	フロー値	250mm
珪砂	重量比 54%	曲げ強度*	6.9N/mm ²
炭素繊維	重量比 3%	圧縮強度*	36.8N/mm ²
添加物等	重量比 7%	接着強度*	2.2N/mm ²
		引張強度*	4.0N/mm ²
<液体>		0.40%	
水分	重量比 73%	伸び能力*	0.40%
アクリル酸エステル共重合体	重量比 27%	透水性**	0.4%
		通気性***	476cm ³ /m ²
その他添加剤	微量	乾燥収縮*	1455cm ³ /m ²
			0.130%

*: 材齢 28 日, **: 加圧水 0.1N/mm²

***: 通気時間(上段 24 時間, 下段 72 時間)

表-2 接着剤塗布箇所および平均塗布厚

ID.	横リブ	底鋼板
H-N-1, H-N-2	---	---
H-S-1, H-S-2	---	○(0.582)
H-SR-1, H-SR-2	○(0.586)	○(0.678)
F-SR-1, F-SR-2	○(0.551)	○(0.750)

※()中の数値は平均塗布厚[mm]

一般的な呼び強度 30 の配合であり、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)および石灰系低添加型膨張材(密度 3.16g/cm³)を使用した。細骨材 1 は広島県呉市産砕砂(表乾密度 2.61g/cm³)、細骨材 2 は大分県津久見市産砕砂(表乾密度 2.66g/cm³)とし、粗骨材は広島県呉市産砕石(表乾密度 2.66g/cm³, 最大寸法 15mm)、および混和剤は AE 減水剤(リグニンスルホン酸・オキシカルボン酸系)である。

底鋼板や横リブに塗布した接着剤を十分に乾燥・硬化させるため、2 週間以上養生した。底鋼板にベニヤ板製の側面型枠を設置し、コンクリートを打設・充填した。なお、実機ミキサによる生コンクリート(0.75m³)を用いたことから、本研究で作製したコンクリートはすべて同

表-3 コンクリートの配合

呼び強度	30
スランプ	8 cm
水結合材比 W/P	47 %
細骨材率 s/a	48.4 %
セメント C	378 kg/m ³
膨張材 E	20 kg/m ³
水 W	187 kg/m ³
細骨材 S	*815 kg/m ³
粗骨材 G	880 kg/m ³
混和剤 Ad	3.98 kg/m ³

*(細骨材 1)+(細骨材 2)=650+165

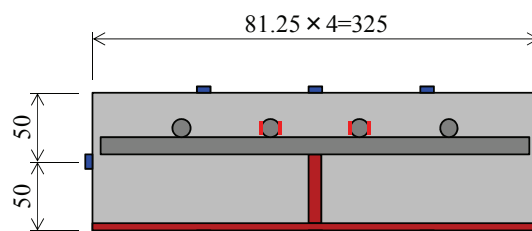
表-4 コンクリートの各試験結果*

圧縮強度	36.7 N/mm ²
割裂引張強度	3.45 N/mm ²
曲げ強度	4.83 N/mm ²
ヤング係数	29.7×10 ³ N/mm ²

*表中の値は各 5 回の試験結果の平均値



写真-1 載荷状況



単位: mm ■ ひずみゲージ: 検長60mm
- ひずみゲージ: 検長5mm

図-2 ひずみ計測位置(スパン中央)

バッチのものである。供試体作製後は屋内にて養生シートを用いた湿潤養生を行い、材齢 7 日に脱枠を行った。脱枠後は供試体を屋外に搬出し、実験に供する材齢 34・35 日まで同様の湿潤養生を行った。

曲げ実験を行うにあたり、直径 100mm×高さ 200mm の円柱供試体を用いて圧縮強度、割裂引張強度およびヤ

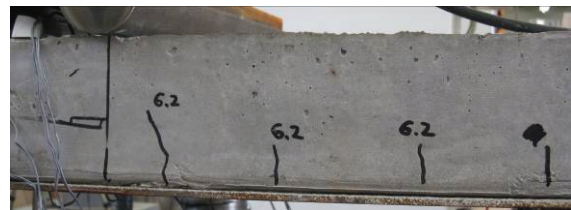
表-5 試験結果

I.D.	P_{max} (kN)	M_{max} (kN・m)	P_{max} 時のたわみ (mm)	S_{max} (mm)	破壊モード*
H-N-1**	31.5	12.2	3.2	---	FC
H-N-2	39.2	15.2	3.9	2.1	FC
H-S-1**	60.8	23.6	7.9	7.8	IC
H-S-2	60.8	23.6	8.6	3.7	IC
H-SR-1**	60.6	23.5	8.9	7.2	IC
H-SR-2	51.1	19.8	8.1	3.0	IC
F-SR-1***	58.9	22.9	7.8	7.9	CC
F-SR-2	73.5	28.5	8.9	1.5	CC

*: FC: ひび割れ 1 本が発生・進展→底鋼板の剥離, IC: スパン中央から複数のひび割れが発生・進展→底鋼板が剥離, CC: コンクリートの圧縮破壊, **: 最大荷重に到達後, 供試体の破壊にともなう荷重減少後も載荷を継続, ***: 繰り返し載荷



(a) 破壊状況 (H-N-1 供試体)



(b) 破壊状況 (H-SR-1 供試体)



(c) 破壊状況 (F-SR-2 供試体)



(d) 底鋼板とコンクリートのすべり (H-S-2 供試体)

写真-2 供試体の破壊状況

ング係数を, 100mm×100mm×400mm の角柱供試体を用いて曲げ強度を求めた。コンクリートの各試験結果を表-4 に示す。なお, 表-4 に示す試験結果は, 実験日程の都合により材齢 33 日に行ったものである。

2.2 実験方法

本研究で行った曲げ実験のスパンは 1800mm であり, 載荷点間距離 250mm の 2 点載荷である。載荷状況を写真-1 に示す。また, 本研究におけるひずみの計測位置(スパン中央)を図-2 に示す。スパン中央ではたわみの計測も行った。荷重をロードセルで計測し, データロガーにリアルタイムで表示される荷重をもとに, Type H 供

試体の場合は荷重 2kN 増, Type F 供試体の場合は荷重 5kN 増を目安にたわみおよび各ひずみを計測した。なお, F-SR-1 を用いた曲げ実験については, 残留たわみや残留ひずみを調べるため, 荷重 10kN 増を目安に除荷を行い, 除荷時にも各データを計測した。F-SR-1 以外の供試体を用いた曲げ実験については, 荷重を漸増させる単調載荷を行った。

3. 結果と考察

3.1 破壊状況

本研究で行った曲げ実験の最大荷重 P_{max} , 最大曲げモーメント M_{max} , P_{max} 時のたわみ, 載荷終了後の供試体端

部における底鋼板とコンクリートのすべり s_{max} および破壊モードを表-5 にまとめて示す。また、各供試体の破壊状況および底鋼板とコンクリートのすべりの状況を写真-2 に示す。

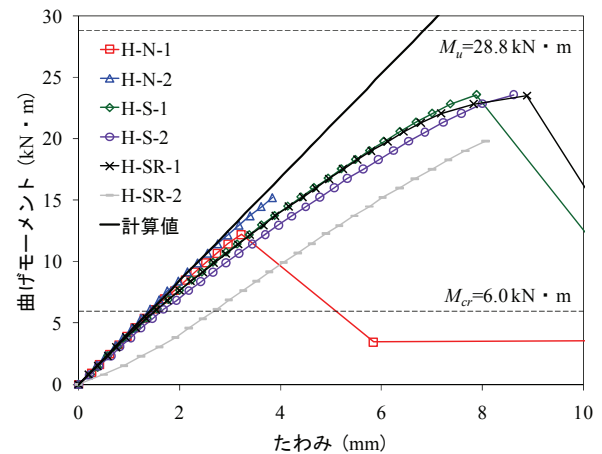
接着剤を塗布していない H-N-1 供試体および H-N-2 供試体では、最初に生じたひび割れを横リブのみでは抑止できず、このひび割れが進展・拡大し供試体上面にまで達した後、底鋼板が剥離し破壊に至った(写真-2(a))。一方、底鋼板に接着剤を塗布した H-S-1 供試体および H-S-2 供試体の場合、スパン中央付近に複数のひび割れが分散して生じ、これらが徐々に進展・拡大し、底鋼板が剥離し破壊した(写真-2(b))。底鋼板に接着剤を塗布することにより、H-S-1 供試体および H-S-2 供試体の最大荷重(モーメント)は 60.8kN (23.6 kN・m) と、接着剤を塗布していない供試体のそれに比べ 1.55~1.93 倍となった。ここで、底鋼板に横リブを設けず、接着剤のみで底鋼板とコンクリートを一体化させた合成はりの曲げ実験では⁵⁾、ひび割れの発生と同時に底鋼板がコンクリートから剥離し、合成はりが破壊した。上述した本研究の結果と既報の結果から、底鋼板に塗布した接着剤のみ、あるいは横リブを設置するだけでは底鋼板とコンクリートを十分に一体化できないものの、両者を複合させることで、より効果的に剥離防止可能と推察される。

底鋼板に加え、横リブにも接着剤を塗布した H-SR-1 供試体の結果は H-S-1 供試体および H-S-2 供試体と同等であり、供試体の破壊状況も同様であった。なお、H-SR-2 供試体の最大荷重は、H-S 供試体や H-SR-1 供試体の最大荷重の 84%程度であった。また、後述するたわみやひずみも荷重のごく初期から、他の 7 体とは明らかに異なる挙動を示した。したがって本研究では、H-SR-2 供試体の結果を適宜示すが、考察の対象からは除外することとした。H-SR-1 供試体の結果から、横リブに塗布した接着剤は、合成はりの構造性能にほとんど影響しないと考えられる。しかしながら、鋼材の腐食防止などの観点から、接着剤を用いた合成床版には横リブにも接着剤を塗布することが望ましいであろう。

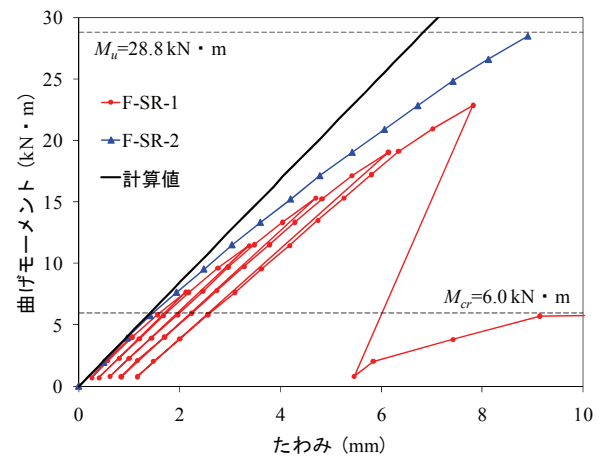
本研究の曲げ実験では、F-SR-2 供試体の最大荷重(モーメント)が 73.5kN (28.5 kN・m) と最も大きく、底鋼板に接着剤を塗布した場合の 60.8kN (23.6 kN・m) の 1.21 倍となった。また、Type H 供試体と異なり、F-SR-2 供試体は上縁のコンクリートが圧壊した。なお、繰り返し荷重を行った F-SR-1 供試体も同様の破壊モードであった。供試体全長にわたり横リブを設置するとともに圧縮鉄筋を配するなど、より実構造に近い Type F 供試体の曲げ実験結果から、コンクリートが圧壊に至るまで、底鋼板とコンクリートが一体となって荷重に抵抗していると考えられる。



写真-3 剥離状況 (H-S-2 供試体)



(a) Type H 供試体



(b) Type F 供試体

図-3 曲げモーメント-たわみ関係

なお、曲げ実験終了後に底鋼板の剥離状況を打音にて確認したところ、供試体端部から 700~810mm の範囲における底鋼板が剥離していた。さらに、コンクリートを破砕し、剥離状況の観察を行った。写真-3 に剥離状況の一例を示す。写真-3 に示すように、底鋼板に接着剤を塗布したいずれの供試体においても、底鋼板に残留する接着剤は局所的であった。大部分の接着剤はコンクリート側に付着しており、剥離が底鋼板~接着剤の界面で

生じていたことがわかる。横リブにおいても同様であり、ほとんどの接着剤はコンクリート側に付着していた。

3.2 たわみ

曲げモーメントと供試体中央におけるたわみの関係を図-3に示す。なお、図中に示す計算値は、鋼・コンクリート間を完全付着、両材料とも弾性体と仮定し、コンクリートの全断面有効として曲げ理論で求めたものである。また、表-5に示す曲げ強度を用いて求めた曲げひび割れ発生モーメント ($M_{cr}=6.0\text{kN}\cdot\text{m}$)、および底鋼板・圧縮鉄筋が降伏していると仮定するとともに、表-5に示す圧縮強度を用いて求めた終局曲げモーメント ($M_u=28.8\text{kN}\cdot\text{m}$)も併せて示している。

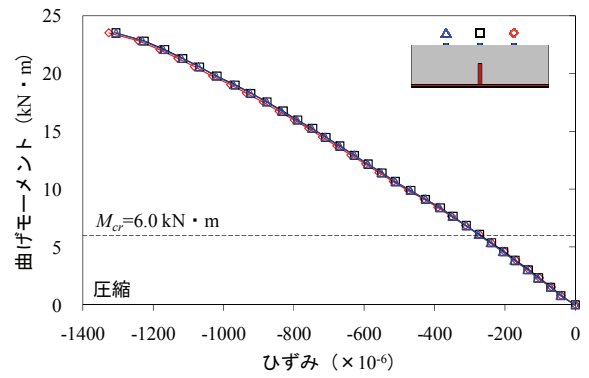
図-3(a)に示すように、Type H 供試体のたわみは、最大荷重の違いはあるものの、それぞれの最大荷重に至るまでのたわみと曲げモーメントの関係は、いずれも同様の曲線状を示した。一方、Type F 供試体の場合、繰り返し载荷を行った F-SR-1 供試体のたわみは、図-3(b)に示すように単調载荷を行った F-SR-2 供試体に比べて大きくなる傾向にあった。

ここで、 M_{cr} に最も近い実験値と計算値の差は -0.05mm ~ $+0.25\text{mm}$ であり、 M_{cr} 程度までは、たわみの実験値と計算値が同等であった。また、 M_{cr} を超えると、計算値に比べ実験値が大きくなる傾向にあった。このことから、目視では確認できなかったが、いずれの供試体においても M_{cr} 付近で微小な曲げひび割れが生じたと推察される。これにより曲げ剛性が低下したため、計算値に比べ実験値が大きくなったと推察される。

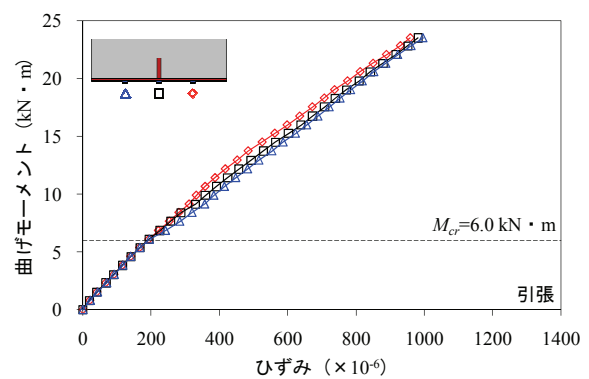
3.3 ひずみ

曲げモーメント-ひずみ関係の例として、H-SR-1 供試体のコンクリート上面および底鋼板下面におけるひずみを図-4に示す。図-4(a)に示すように、コンクリート上面の3箇所計測したひずみは、いずれも同様の挙動を示した。また図-4(b)に示すように、底鋼板下面も3箇所ともに曲げモーメント-ひずみ関係が同様の曲線状を呈した。また、 M_{cr} までは、底鋼板下面における3箇所のひずみの差が最大でも 3×10^{-6} であったが、 M_{cr} を超えた $6.8\text{kN}\cdot\text{m}$ ではその差が 21×10^{-6} となった。ここで、底鋼板下面における曲げモーメント-ひずみ関係を図-5にまとめて示す。いずれの供試体においても、 M_{cr} 程度で曲げモーメント-ひずみ関係に折れ点が生じた。このような折れ点や前述した図-4(b)に示すひずみ差は、3.2でも述べたように、ひび割れの発生に起因するものと考えられる。

また、図-5に示すように、最大荷重の差はあるものの、底鋼板下面における曲げモーメント-ひずみ関係は、繰り返し载荷を行った F-SR-1 供試体を除き、ほぼ同じ曲線であった。一方、繰り返し载荷を行った F-SR-1 供試体



(a) コンクリート上面ひずみ



(b) 底鋼板下面ひずみ

図-4 曲げモーメント-ひずみ関係 (H-SR-1 供試体)

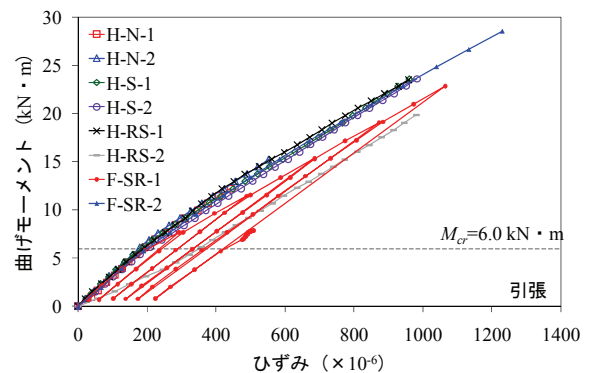
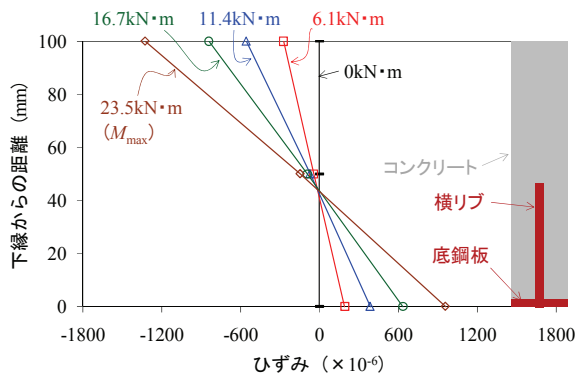


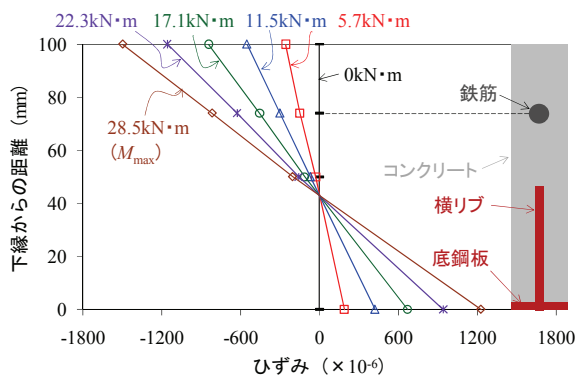
図-5 曲げモーメント-ひずみ関係 (鋼板下面ひずみ)

の最大荷重時のひずみは、同荷重時における F-SR-2 供試体のひずみに比べ 100×10^{-6} 以上大きく、その直後の除荷時における残留ひずみも 200×10^{-6} を超えた。このときの繰り返し回数は6回である。F-SR-2 供試体では、上縁コンクリートが圧壊したように、接着剤を用いた合成部材は静的荷重下では十分な耐力を有するものの、繰り返し荷重が作用する場合の疲労耐久性も懸念される。

H-SR-1 供試体および F-SR-1 供試体のスパン中央におけるひずみ分布を図-6に示す。なお、図-6には曲げ



(a) H-SR-1 供試体



(b) F-SR-2 供試体

図-6 ひずみ分布

モーメント $6\text{kN}\cdot\text{m}$ ごとを目安にひずみ分布を示している。図-6(a)に示す H-SR-1 供試体のスパン中央におけるひずみ分布は、最大荷重時においても概ね直線状であった。また、より実構造に近い F-SR-2 供試体では、圧縮鉄筋のひずみを加えても、図-6(b)に示すようにひずみ分布がほぼ直線であった。なお、ひずみ分布の直線回帰式の R^2 値は、いずれも 0.99 を超えた。このような結果は、他の供試体においても同様であった。前述したように、荷重が $M_{cr}=6.0\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度になると、いずれの供試体においても曲げひび割れが生じていたと考えられ、生じたひび割れが徐々に進展・拡大する様子を目視で確認した。このようなひび割れの進展・拡大と図-6 に示す直線状のひずみ分布から、曲げひび割れ発生後も平面保持の仮定は成り立っており、底鋼板とコンクリートは充分に一体化していると考えられる。また、平面保持則が成立することにより、一般的な鉄筋コンクリート構造と同様に、接着剤を用いた合成部材の曲げ挙動を評価・予測できると推察される。

4. まとめ

本研究の最終的な目的は、接着機能を有する無機系防錆剤を活用することで、できるだけ構造を簡素化した合

成床版を開発・実用化することである。その基礎研究として、底鋼板とコンクリートの剥離に対する横リブや接着剤の効果を調べた。本研究で得られた結論を以下に要約する。

- (1) 横リブ・接着剤単体では、コンクリートに生じたひび割れを抑止することができず、底鋼板とコンクリートの剥離を充分に防止することは困難であるが、両者を併用することで剥離抑止が可能である。
- (2) 実構造を模擬した供試体を用いた曲げ実験では、上縁のコンクリートが圧壊に至ったことから、接着剤と横リブによるずれ止め構造でも、コンクリートが終局に至るまで、底鋼板とコンクリートが一体となって荷重に抵抗できる。
- (3) 曲げひび割れ発生モーメント程度までは、たわみの実験値と計算値の差が最大でも 0.25mm であり、両者がほぼ一致した。
- (4) 最大荷重に至るまでひずみ分布がほぼ直線状を呈したことから、平面保持則の成立が確認され、接着剤を用いた合成部材の曲げ挙動を、一般的な鉄筋コンクリート構造と同様に評価・予測できると推察される。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、前田産業(株) 幾島正起氏、元山口大学大学院理工学研究科 七村祐輔氏、元呉工業高等専門学校環境都市工学科 岡本未歩氏・柏原健太氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会：鋼・コンクリート合成床版の計画資料(設計例と解説)、pp.53-79、2006.4
- 2) 中井 博、堀川都志雄、堀松正芳、真田健司：トラス型ジベルを用いた合成床版の設計・製作・施工について、土木学会論文集、No.486/VI-22、pp.65-74、1994.3
- 3) 街道 浩、松井繁之：鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のせん断疲労強度評価、土木学会論文集 A、Vol.64、No.1、pp.60-70、2008.1
- 4) 山本泰幹、川畑篤敬、長井正嗣：縦リブ複合床版構造の一案、土木学会論文集 F、Vol.66、No.4、pp.647-659、2010.12
- 5) 七村祐輔、吉武 勇、三村陽一、和多田康男：フレッシュ時から接着した鋼コンクリート合成部材の基礎実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.2、pp.1212-1218、2010