

## 論文 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

七村 祐輔\*<sup>1</sup>・吉武 勇\*<sup>2</sup>・三村 陽一\*<sup>3</sup>・和多田 康男\*<sup>4</sup>

**要旨：**本研究は、無機系接着剤を併用した鋼コンクリート合成床版の開発を主目的とするものである。本論文では、同接着剤を用いた鋼コンクリート合成部材の基礎的性状を報告する。鋼コンクリート合成要素を用いた体積変化実験では、材齢3日以降において上部鉄筋、コンクリート、下部鉄筋、鋼板におけるひずみの分布は線形性を示し、コンクリートおよび鋼板が一体となって挙動することがわかった。また、接着剤およびスタッドによる大型はり供試体を用いた曲げ実験では、ひび割れ発生応力がほぼ同程度となり、最大引張ひずみが $150 \times 10^{-6}$ 程度と差異はみられなかった。これらの実験的観察より、同接着剤の合成床版への適用の可能性が推察された。

**キーワード：**鋼コンクリート合成床版, 接着剤, スタッド, ひずみ分布

### 1. はじめに

近年、しばしば橋梁に用いられる鋼コンクリート合成床版(以下、合成床版と略記)には、コンクリートと鋼板のずれ止めとしてスタッド等が主に用いられている<sup>1)3)</sup>。しかしながら、このような合成床版では、スタッドの機械的ずれ止めを用いるために工費が高み、施工の煩雑性をもたらす。また、スタッド等の機械的ずれ止めを多用した合成床版では、コンクリートの充填において、施工性の低下を招くおそれもある。

さらに合成床版では、コンクリートの収縮を機械的ずれ止め等が拘束することにより、ひび割れが生じやすくなる。この一方策として、合成床版にはコンクリートの収縮補償を目的とし、膨張材を添加したコンクリート(膨張コンクリート)を用いることが原則となっている<sup>4)</sup>。

接着機能を有する無機系防錆材(以下、接着剤と略記)は、これまで鋼構造物塗布面の腐食防止材として用いられてきたものであるが、鋼とコンクリート間の付着強度も向上できることがわかってきた。特に、この接着剤はフレッシュコンクリートから硬化コンクリートに至る過程で、接着効果を発揮する特徴を有している。この接着剤を合成床版に用いることで、機械的ずれ止めの一部代替材としての役割を果たし、機械的ずれ止めを用いるよりも優れた経済性を示す可能性もある。また、機械的ずれ止めの簡略化によって、工場製作時の施工性の向上も期待でき、さらにはコンクリートの収縮ひび割れを低減できる可能性も高い。本論文は、この接着剤を合成床版に適用するための基礎データを収集する目的で、鋼コンクリート合成はり部材等を用いて実施した基礎実験について報告するものである。

### 2. 無機系防錆材(接着剤)の材料特性

本研究で用いる接着剤は、粉末と液体の二成分からなる。その粉末および液体の接着剤を写真-1に示す。粉末の接着剤には、アルカリ性を付与するための白色セメント、微細骨材としての珪砂、強度向上のための炭素繊維( $\phi 8\mu\text{m} \times 2 \sim 3\text{mm}$  長)、アルカリ性の長期保持のためのカルシウム系アルカリ付与剤が含まれている。また、液体の接着剤には、接着強度向上のためのアクリル酸エステル共重合体、高温耐久性向上のための高温耐久性付与剤、および付着強度向上剤が含まれている。両者を混合した接着剤は、鋼とコンクリートの接着性を、コンクリートのフレッシュ時から硬化に至る過程で向上させ、長期間にわたって耐久性および防錆機能を維持できる。さらに、この接着剤は強アルカリ性のため、塗布前に赤錆除去の必要がなく、安定した黒錆へと転換され、アル



写真-1 粉末および液体の接着剤

\*1 山口大学大学院 理工学研究科博士前期課程 社会建設工学専攻 (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 呉工業高等専門学校 環境都市工学科助教 博(工) (正会員)

\*4 宇部興産機械(株) 橋梁鉄構部部長 博(工)

カリ性塗膜に覆われて腐食の進行を防ぐことができる。従来の合成床版においてはコンクリート打設までの一次防食塗装が不可欠であったが、本研究における接着剤を用いることで同作業が不要となる。さらに本来の機能である防錆材として合成床版の鋼殻を一時的に保管することもでき、ひいては施工の合理化にも寄与できるものと思われる。

### 3. 体積変化に伴うひずみ挙動

#### 3.1 配合条件および使用材料

本実験におけるコンクリートの配合条件を表-1に示す。本研究では、膨張コンクリートを標準使用する合成床版への適用を念頭におき、普通ポルトランドセメント(密度  $3.16\text{g/cm}^3$ )と石灰系低添加型膨張材(密度  $3.16\text{g/cm}^3$ )を用いた。なお、細骨材として岡山県倉敷産高炉スラグ(表乾密度  $2.76\text{g/cm}^3$ )、北九州市門司産硬質砂岩砕砂(表乾密度  $2.63\text{g/cm}^3$ )および山口県美祢市伊佐産石灰砕砂(表乾密度  $2.63\text{g/cm}^3$ )の混合砂を用い、北九州市門司産砕石(表乾密度  $2.73\text{g/cm}^3$ )を粗骨材として用いた。さらに、AE 減水剤標準形を混和剤として用いた。

#### 3.2 実験供試体とひずみの計測方法

本実験では、合成床版の実大厚を想定した鋼板(9×300×600mm; SS400)の一面に接着剤を塗布(平均厚:0.6mm)後、実験室内に3日以上静置することで同表面を十分に乾燥させた。この鋼板を最下部に設置し、鋼板周囲にベニヤ板製型枠を設け、コンクリートを打設・充填することで、200×300×600mm 状の鋼コンクリート合成構造の要素供試体(以下、合成要素)を作製した。合成要素の模式図を図-1に示す。合成要素を実験室内で作製し、材齢3日から恒温機中(温度  $20^\circ\text{C}$ および湿度  $60\%$ )に設置し、体積変化によるコンクリート、鉄筋および鋼板のひずみを測定した。

なお本実験では、図-1に示すように、合成床版を模擬するため、鉄筋のかぶりをそれぞれ40mmと設定し、鋼板のある底面から160mm位置にD13、同40mm位置にD19の鉄筋を配置した。これらの鉄筋には検長3mmのひずみゲージを貼り、鋼板の表面には検長20mmのひずみゲージを貼付した。また、埋込型変位計をコンクリート中に埋設した。本実験では、6時間ごとに、1ヶ月(31日)間、ひずみの計測を行った。

#### 3.3 体積変化に伴うひずみ挙動

合成要素の体積変化に伴うひずみ分布を図-2に示す。合成要素を恒温機内に材齢3日で設置しており、鋼板では材齢3日以降においてひずみを0としているため、図-2を(a)および(b)と分けている。図-2に示すように、埋込型変位計を設置したコンクリート中心には、材齢3日までに  $110 \times 10^{-6}$  程度の膨張ひずみが生じた。材齢

表-1 3・4章の実験で用いたコンクリートの配合

W/P	48%	
Water	161kg/m <sup>3</sup>	
Cement	316kg/m <sup>3</sup>	
Expansive additive	20kg/m <sup>3</sup>	
Fine aggregate	Blast furnace slag	257kg/m <sup>3</sup>
	Sandstone	300kg/m <sup>3</sup>
	Limestone	299kg/m <sup>3</sup>
Coarse aggregate	Sandstone 2010	601kg/m <sup>3</sup>
	Sandstone 1505	401kg/m <sup>3</sup>
Admixture	2.69kg/m <sup>3</sup>	

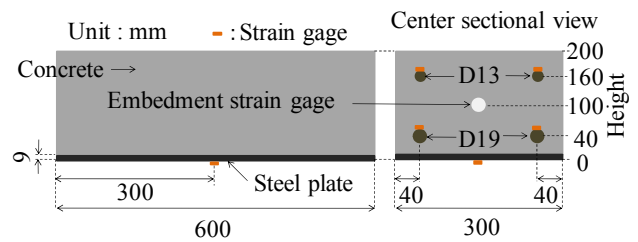
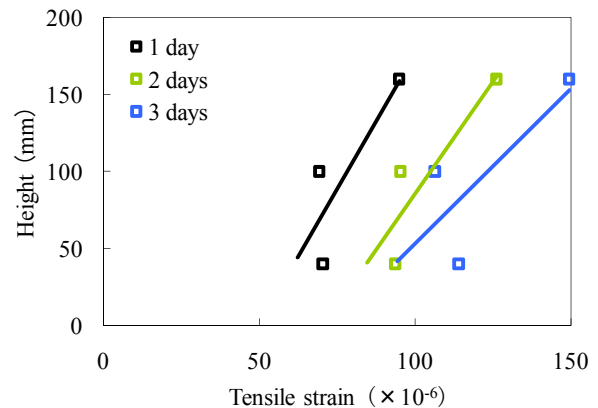
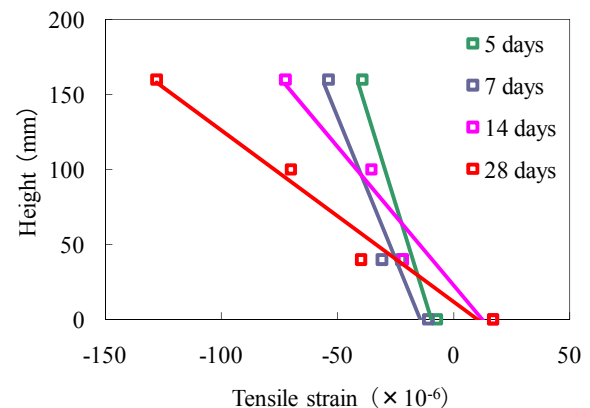


図-1 合成要素の模式図



(a) 材齢 1, 2, 3 日



(b) 材齢 5, 7, 14, 28 日

図-2 合成要素中のひずみ分布

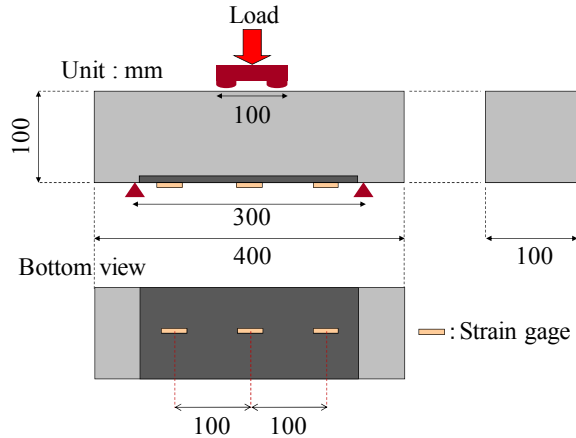


図-3 小型合成はり と 載荷方法

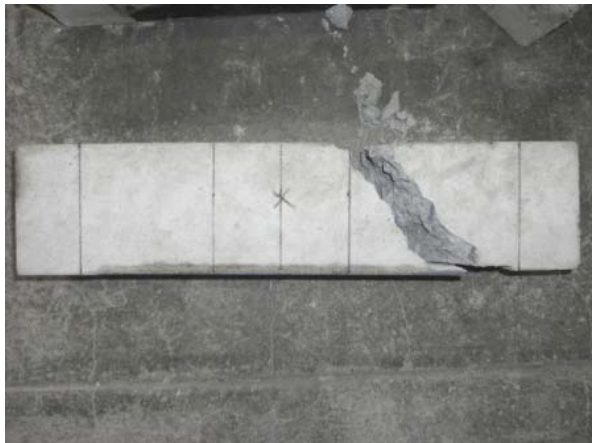


写真-2 小型合成はりの破壊状況

3日以降は収縮に転じ、材齢 28 日において  $-70 \times 10^{-6}$  程度の収縮ひずみが生じている。また、鉄筋のひずみもコンクリートのひずみ変化に応じて、材齢 3 日までは膨張ひずみが生じ、材齢 3 日以降は収縮に転じた。一方、鋼板のひずみは恒温機内に設置した材齢 3 日から計測した。材齢 28 日において、上部鉄筋・コンクリート・下部鉄筋・鋼板の各部位のひずみは  $-130 \times 10^{-6}$ 、 $-70 \times 10^{-6}$ 、 $-40 \times 10^{-6}$ 、 $20 \times 10^{-6}$  程度となり、線形的なひずみ分布となった。これは材齢 3 日以降のすべてのひずみ分布において同様である。この結果より、コンクリート、鉄筋および鋼板が、フレッシュ時から材齢 28 日にかけて十分な硬化に至るまでに一体的な挙動を示していることがわかる。なお、鋼板のひずみは、恒温機内の循環風のため、詳細な変化を計測することができなかった。そこで、本研究では鋼コンクリートの一体性の詳細な評価のため、曲げモーメント作用下におけるひずみについて論じることとする。

#### 4. 小型合成はりを用いた曲げ実験

##### 4.1 実験概要

本章では、前章同様に接着剤を塗布した鋼板に膨張コ

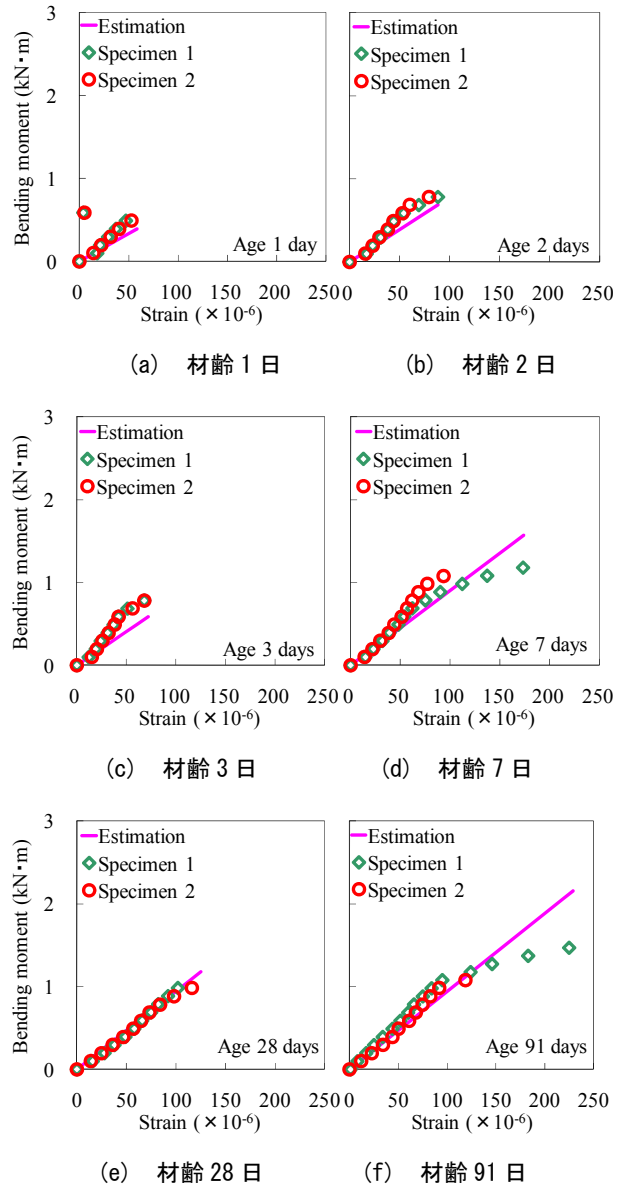


図-4 曲げモーメント-ひずみ関係

ンクリートを打設して小型合成はりを作製し、曲げ実験におけるひずみの実験値と完全付着と仮定して求めた計算値の相関性を調べた。

##### 4.2 実験供試体および載荷方法

本章のコンクリートの配合および使用材料は、前章同様である。本実験で用いた小型合成はりおよび載荷方法を図-3に示す。図-3に示すように、接着剤を塗布した厚さ 3.2mm の鋼板 (SS400) 上に、 $100 \times 100 \times 400$ mm サイズとなるようにコンクリートを打設し作製した小型合成はりを用いて曲げ実験を行った。

小型合成はりにおける鋼板のひずみの計測位置は、図-3に示すとおりである。ひずみを  $0.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$  毎に測定し、コンクリートの破壊または鋼板が剥離するまで載荷した。

実験を行った材齢は 1, 2, 3, 7, 28, 91 日であり、1 材齢に小型合成はりを 2 体ずつ用いて曲げ実験を行った。

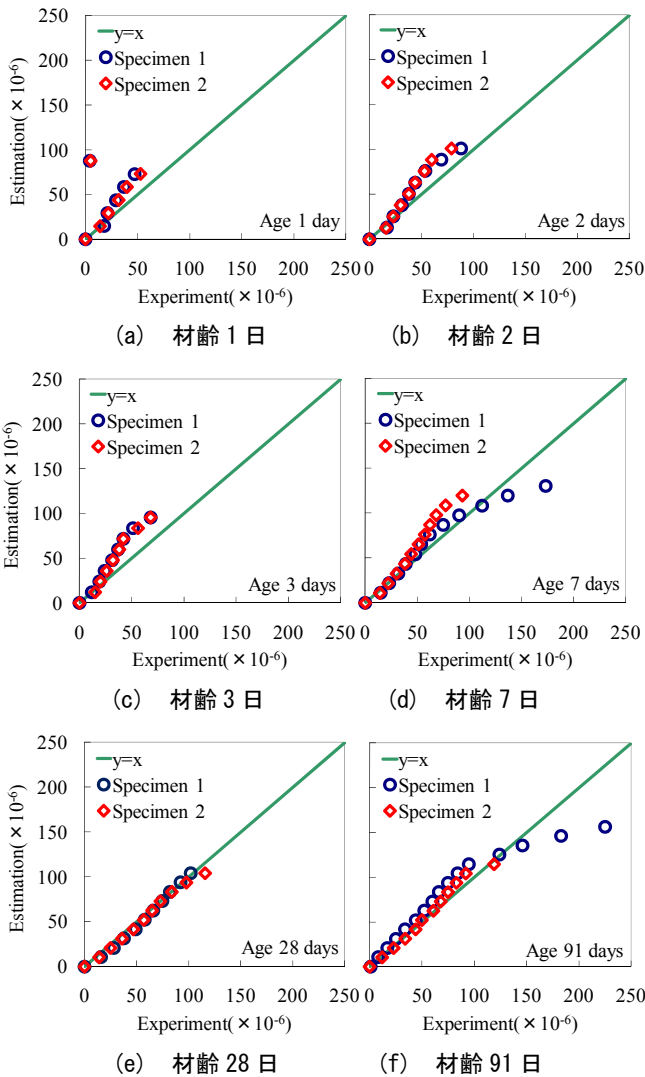


図-5 ひずみの実験値と計算値の相関性

なお曲げ実験に供するまで、各小型合成はりに十分な湿布養生を施したため、水分逸散による乾燥収縮はほとんど生じていないと仮定できる。

### 4.3 実験結果および考察

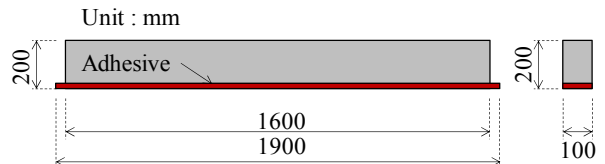
写真-2に小型合成はりの破壊状況を示す。写真-2に示すように、各材齢の破壊形態は斜めせん断破壊であり、鋼板端部から荷重点へ向かってひび割れが生じ、脆性的に破壊した。また、曲げモーメント-ひずみ関係を示す図-4によると、各材齢においてひび割れが発生するまで線形性を示し、以降ひずみ(実験値)が増加し、破壊に至った。

供試体中央断面における、ひずみの実験値と完全付着と仮定して求めたひずみの計算値の整合性を図-5に示す。ひずみの実験値と計算値の整合は、すなわちひび割れ発生まで断面保持則が成り立ち、鋼コンクリートの一体性を表す一指標となる。

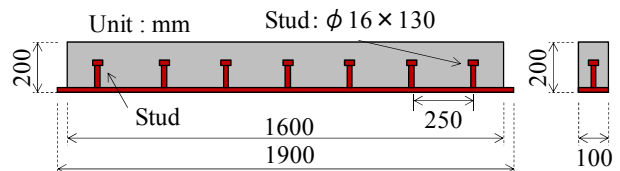
図-5に示す  $y=x$  の線に対し、ひび割れが発生する

表-2 5章の実験で用いたコンクリートの配合

W/P	47%	
Water	172kg/m <sup>3</sup>	
Cement	346kg/m <sup>3</sup>	
Expansive additive	20kg/m <sup>3</sup>	
Fine aggregate	Crushed sand 1	606kg/m <sup>3</sup>
	Crushed sand 2	154kg/m <sup>3</sup>
Coarse aggregate	1006kg/m <sup>3</sup>	
Admixture	3.66kg/m <sup>3</sup>	



(a) 接着剤のみを用いた大型合成はり



(b) スタッドを用いた大型合成はり

図-6 大型合成はりの模式図

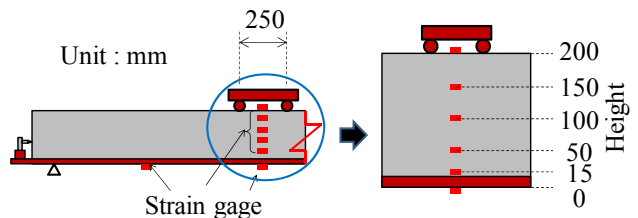


図-7 大型はりの荷重状況

までの実験値と計算値との差異は、材齢1日において  $20 \times 10^{-6}$  ほど実験値が小さくなり、材齢2日・3日・7日では約  $20 \sim 30 \times 10^{-6}$  実験値が小さかった。材齢28日では  $5 \times 10^{-6}$  程度の差異が生じ、材齢91日では  $5 \sim 10 \times 10^{-6}$  程度と小さく、材齢28日以降において両者のひずみの差異は小さくなった。このことは、曲げ荷重作用下においても、鋼板とコンクリートが堅固に接着することを示唆した結果と考えられる。

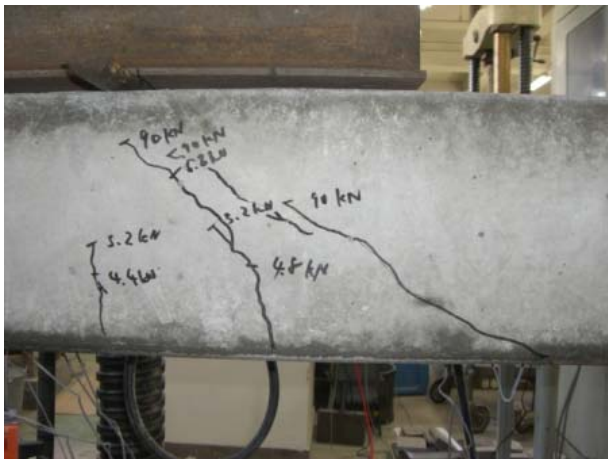
## 5. 大型合成はりを用いた曲げ実験

### 5.1 実験目的

本実験では、接着剤およびスタッドを用いた大型合成はり(実寸大の合成床版の一要素)の曲げ実験を行うことにより、ひび割れ発生までのひずみ分布を主に調べた。この比較実験に基づき、接着剤を用いた実大サイズの合



(a) 接着剤仕様



(b) スタッド仕様

写真-3 大型合成はり中央における破壊状況

成構造について、基礎的性状を把握することを目的とした。

### 5.2 配合条件および使用材料

本実験におけるコンクリートの配合条件を表-2に示す。ここで作製したコンクリートにおいても、普通ポルトランドセメント(密度  $3.16\text{g/cm}^3$ )と石灰系低添加型膨張材( $3.16\text{g/cm}^3$ )を用いた。その他の材料として細骨材には広島県呉産砕砂(表乾密度  $2.61\text{g/cm}^3$ )、大分県津久見産砕砂(表乾密度  $2.66\text{g/cm}^3$ )を用い、粗骨材には広島県呉産砕石(表乾密度  $2.66\text{g/cm}^3$ )、および混和剤には AE 減水剤標準形を用いた。

### 5.3 実験供試体および荷重方法

本実験における(a)接着剤および(b)スタッドを用いた大型合成はりを図-6に詳述し、また大型合成はりの荷重状況を図-7に示す。図-6に示すように、大型合成はりには  $100 \times 200 \times 1700\text{mm}$  とし、その底面には鋼板( $100 \times 9 \times 1900\text{mm}$ ; SM400A)を用いた。接着剤仕様の大型合成はり(a)、およびスタッド( $\phi 16 \times 130\text{mm}$ )を

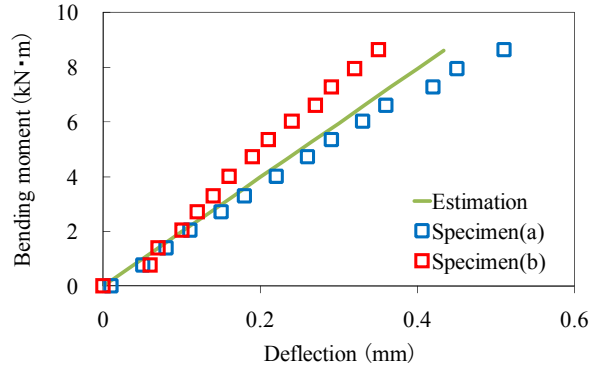
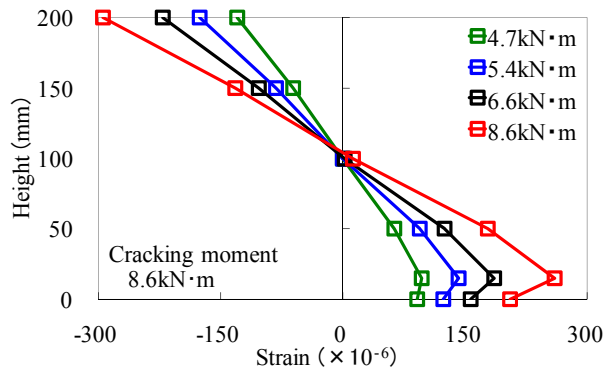
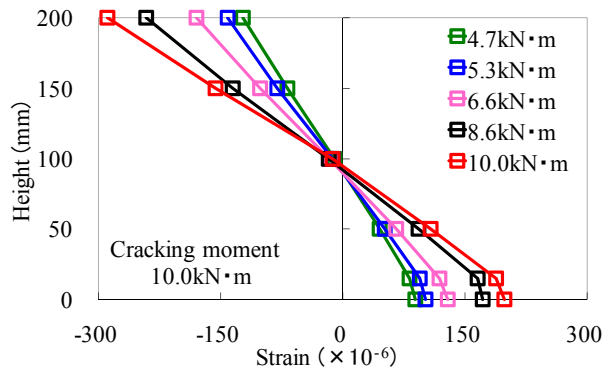


図-8 スパン中央たわみ



(a) 接着剤仕様のひずみ分布



(b) スタッド仕様のひずみ分布

図-9 大型合成はりのひずみ分布

250mm 間隔で配置した大型合成はり(b)を作製し、材齢 28 日で曲げ実験を行った。本実験におけるひずみの計測位置は、大型合成はりのコンクリート上面中央に 2 箇所、コンクリート側面に下縁から 15mm, 50mm, 100mm, 150mm の 4 箇所、鋼板下面の中央に 2 箇所と支点と荷重点間中央両端に 2 箇所とした。曲げモーメント荷重  $0.3\text{kN}\cdot\text{m}$  毎にスパン中央のたわみと各ひずみを測定し、コンクリートの破壊あるいは鋼板の剥離が生じるまで荷重した。

#### 5.4 曲げ実験による結果と考察

図-8には大型合成はり中央におけるたわみを示す。なお、ここに示す計算値は、鋼・コンクリート間を完全付着と仮定して求めたものである。図-8に示すように、大型合成はり(a)および(b)において、曲げモーメントが $3\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度までは中央たわみが $0.1\text{mm}$ 程度であり、計算値も同等であった。大型合成はり(a)における中央たわみは、ひび割れが発生するまでは計算値との整合性がみられたが、それ以降は $0.1\text{mm}$ 程度の差異が生じた。大型合成はり(b)におけるたわみは $3\text{kN}\cdot\text{m}$ 以降で計算値と $0.1\text{mm}$ 程度の差異が生じた。なお、結果的には(a)接着剤を用いた大型合成はりがコンクリートの曲げひび割れに起因し、鋼板の剥離損傷が生じたため、以降の比較検討ではコンクリートのひび割れ曲げモーメントまでの挙動について主に報告する。すなわち、本論文においては比較に用いたスタッドによる大型合成はり(b)の終局状態についても、特に取り扱わない。

ここで、写真-3に、大型合成はり(a)および(b)における破壊時の状況を示す。写真-3に示すように、大型合成はり(a)および(b)では、それぞれ $8.6\text{kN}\cdot\text{m}$ および $31.1\text{kN}\cdot\text{m}$ で斜めせん断破壊した。接着剤仕様の大型合成はり(a)は、鋼板下面の中央から $300\text{mm}$ 程度の位置から載荷点に向かって、1本のひび割れが発生したと同時に破壊した。一方、スタッド仕様の大型合成はり(b)では、鋼板下面の中央から $500\text{mm}$ 程度の位置から最初のひび割れが発生した後も、複数のひび割れが発生・進展しながら、破壊に至った。

大型合成はり(a)および(b)における、コンクリートにひび割れが生じるまでのひずみ分布の推移を図-9に示す。なお、大型合成はり(a)および(b)のひび割れ発生時の曲げモーメントは、それぞれ $8.6\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $10.0\text{kN}\cdot\text{m}$ である。図-9に示すように、大型合成はり(a)におけるひび割れ発生までのひずみ分布では、概ね平面保持を呈しており、鋼・コンクリート間の接着効果がうかがえる。また、大型合成はり(b)では低い曲げモーメント荷重レベルにおいて、コンクリートに比べ、鋼板のひずみが小さく、平面保持が成立していないが、曲げモーメントが大きくなるにつれ、部材内で平面保持を示すことがわかる。しかしながら、コンクリートの一般的な伸び能力 $100\times 10^{-6}$ 程度を超過したあたりから、鋼・コンクリート間の一体化が損なわれる可能性がうかがえた。そのため、スタッド等の機械的なずれ止めの代替材として、接着剤のみを用いた合成床版では終局荷重で充分な一体性が得られないため、スタッド等の機械式ずれ止めとの併用が望まれる。

また、ひび割れ発生までのひずみ分布において、大型合成はり(a)および(b)の鋼板ひずみは最大引張ひずみが

$150\times 10^{-6}$ 程度であり差異はみられなかった。大型合成はり(a)および(b)のひずみ挙動は相似しており、接着機能を有する無機系防錆剤の合成床版への適用の可能性が推察された。

#### 6. まとめ

本研究では、接着機能を有する無機系防錆材を合成床版に適用するための基礎研究として、鋼コンクリート合成はり部材等を用いて、実験的検討を試みた。本研究で得られた知見を以下に要約する。

- (1) 鋼コンクリート合成要素におけるひずみ変化では、材齢3日以降において、上部鉄筋・コンクリート・下部鉄筋・鋼板におけるひずみの分布が線形性を示し、コンクリートと鋼板が一体となって挙動することがわかった。
- (2) 小型合成はりの曲げ実験では、ひび割れ発生まで、完全付着と仮定して求めたひずみの計算値と実験値との差異は、材齢28日以降においてほぼなくなった。すなわち、このように十分に硬化したコンクリートでは、鋼コンクリートが堅固に接着し、曲げ荷重などの外力に対し、一体となって抵抗できることを示唆している。
- (3) 接着剤およびスタッドを用いた大型合成はりをを用いた曲げ実験では、鋼板に生じた最大引張ひずみが約 $150\times 10^{-6}$ と同程度であった。この結果より、実大サイズの合成構造においても、接着機能を有する無機系防錆剤の適用性が推察された。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、前田産業(株)の幾島正起氏および宇部興産機械(株)の川内康寛氏・小川淳史氏に御協力頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 街道 浩, 渡辺 滉, 橘 吉宏, 松井繁之, 栗田章光: 鋼・コンクリート合成床版を適用したプレストレスしない連続合成げたの中間支点部の静的載荷試験, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1115-1126, 2003.
- 2) 街道 浩, 渡辺 滉, 橘 吉宏, 田坂裕一, 松井繁之, 堀川都志雄: 鋼・コンクリート合成床版のスタッドに作用するせん断力の性状について, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1531-1540, 2005.
- 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スタッドの疲労強度評価, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.765-777, 2008.
- 4) 日本橋梁建設協会: 鋼橋の Q&A コンクリート系床版編, p.63, 2006.9.