

# 論文 AFRP ロッドを用いた RC 梁における補強材断面積比がその挙動に与える影響

瀬下 椋太\*1・大西 弘志\*2・小林 宣博\*3・小野寺拓己\*4

**要旨:** 鉄筋コンクリート構造物において、鉄筋の腐食を起点とするひび割れや剥離等の問題を解決するため、著者らは鉄筋の代わりに塩化物等の作用で腐食を生じない AFRP ロッドを使用することを考えた。既往の研究では RC 梁の鉄筋を同等の径の AFRP ロッドに変更した場合、梁全体の剛性が 1/5~1/6 程度となり荷重に伴い過大に変形することが確認された。本研究では AFRP ロッドを補強材として使用したコンクリート梁で AFRP ロッドの断面積比を変化させた試験体に対して 4 点曲げ荷重試験を実施し、梁の挙動に与える影響を調査した。その結果、断面積比を変化させることで、梁の剛性を調整できる可能性を確認することができた。

**キーワード:** AFRP, 曲げ剛性, 断面積比

## 1. はじめに

コンクリート系橋梁 (RC 橋, PC 橋) の上部工に発生し、架け替えの理由となった深刻な損傷には鉄筋の腐食損傷やコンクリートのひび割れ、剥落が常に一定の割合を占めている<sup>1)</sup>。鉄筋の腐食損傷が進行すると鉄筋断面の欠損が生じるとともに、腐食生成物による膨張圧により鉄筋周辺のコンクリートにひび割れ等の損傷を引き起こし、構造物としての一体性の喪失と性能低下をもたらすことが懸念される。

RC 構造, PC 構造の部材においてその表面から塩化物等の腐食要因物質の浸入を完全に防ぐことは困難である。このため、著者らは鉄筋の腐食とそれに伴う損傷を防止するための方法として AFRP (Aramid Fiber Reinforced Plastic) 製のロッド材を使用することを考えた。AFRP ロッドは鉄筋と異なり塩化物による影響を受けず、高い引張強度、優れた耐食性、耐久性、軽量性などの特徴を持つが、一般的に鋼材よりも弾性係数は小さくなることが知られている<sup>2)</sup>。AFRP ロッドでは酸化反応に基づく腐食損傷を生じることではないため、AFRP ロッドを使用する際にはコンクリートのかぶり厚を縮小できるのではないかと考えた。既往の研究<sup>3)</sup>では、AFRP ロッドを使用した T 形断面梁のモデルでウェブ側面のかぶり厚を変化させたうえで 4 点曲げ静的荷重試験を実施した結果、かぶり厚を 30mm よりも小さくしても AFRP ロッドとコンクリート間の付着に影響がない範囲であれば梁の挙動に与える影響は軽微であることが確認できた。同時にこの試験では AFRP ロッドを使用した梁では同径の鉄筋を使用した RC 梁と比較して、曲げ剛性が 1/5~1/6 程度にとどまることが確認された。この原因としては AFRP の弾性

表-1 試験体一覧

試験体名	主筋(φ24)本数	試験体数
Case1	1本	各3体
Case2	2本	

表-2 材料物性値

材料	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	59.6		29.1
AFRP ロッド (φ24)		1177	66.5
AFRP ロッド (φ5)		1298	69.7

係数が鋼材の弾性係数の 1/3 程度となっていることによるものと推定された。従来の FRP が関係する研究では耐力のみが着目され、使用時の変形状態に関する剛性についての検討がほとんどなされていない。実際に構造物に供用する際には使用時の変形が使用限界内に収まる必要があり、そのためには構造部材としての剛性を RC 部材に近づける必要がある。

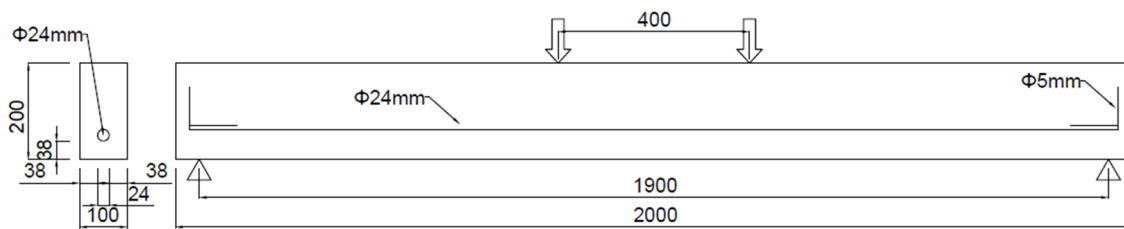
本研究では鉄筋の代わりに AFRP ロッドを使用した場合、補強材である AFRP ロッドの弾性係数が小さいことに起因する梁の曲げ剛性の不足を補うための手法として AFRP ロッドの断面積比を RC 梁の鉄筋比よりも大きくすることを考えた。本研究では AFRP ロッドの断面積比が異なる 2 種類の梁モデルを作成し、このモデルに対して 4 点曲げ静的荷重試験を実施し、補強材として使用される FRP の断面を操作することで、部材剛性の調整をす

\*1 岩手大学大学院 総合科学研究科 地域創生専攻 (学生会員)

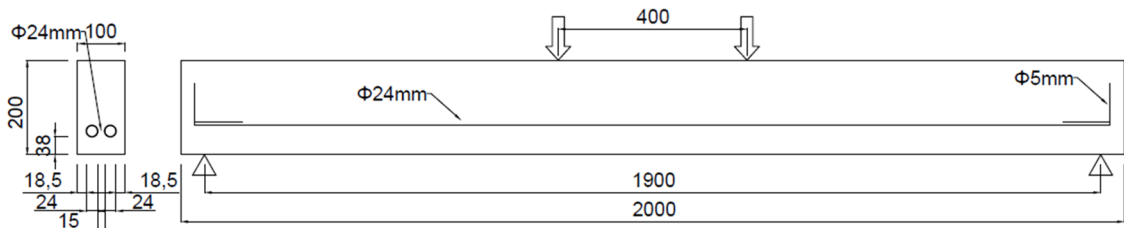
\*2 岩手大学 理工学部システム創成工学科教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 株式会社 竹入製作所

\*4 岩手大学 理工学部システム創成工学科



(a) Case 1



(b) Case 2

図-1 各試験体の概要 (単位: mm)



図-2 荷重状況

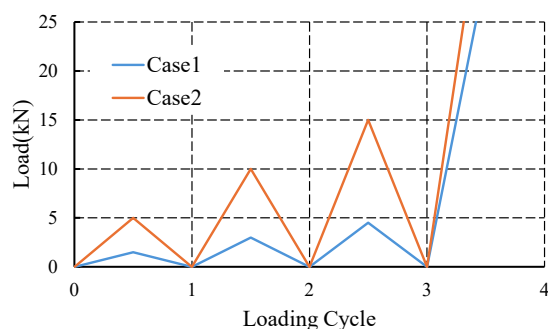


図-3 荷重プログラム

ることが可能かを調査することにした。

## 2. 荷重試験

### 2.1 試験体概要

表-1 に試験体の一覧, 表-2 に本試験で使用した材料の物性値, 図-1 に各試験体の形状寸法と配筋を示す。本研究では AFRP ロッドの断面積比に起因する曲げ剛性の違いが梁の挙動に与える影響を調査するため, Case1 では AFRP ロッドの断面積比として鉄筋を使用した場合<sup>4)</sup> と同等の断面積比とした試験体である。Case2 は Case1 と比較して 2 倍の断面積比を設定した梁とした。Case2 の試験体では, 既往の研究を参考にコンクリートの側面かぶり厚を縮小したモデルとしている。試験体数は 1 ケースあたり 3 体とし, 試験体名は Case1-1 のように試験体名の第 1 項を試験体のケース名, 第 2 項を試験体番号としている。試験体は全長 2000mm(支間長 1900mm), 幅 100mm×高さ 200mm の矩形断面である。AFRP ロッドの芯の位置を底面から 50mm としている。主筋には  $\phi 24$ , 長さ 1940mm の AFRP ロッドを使用し, その両端には  $\phi$

5 の AFRP ロッドを L 字形に加工したものを設置してフックとした。AFRP ロッドの表面にはコンクリートとの付着を確保するために珪砂付着処理を施した。

### 2.2 荷重方法

図-2 に示すように, 支間長 1900mm, 等曲げ区間 400mm の 4 点曲げ荷重により試験を実施した。図-3 に今回の荷重試験で各 Case に対して適用した荷重ステップを示す。Case1 では荷重初期の挙動と初期ひび割れを記録するため, 荷重が 1.5kN, 3.0kN, 4.5kN に達した時点でひび割れの確認と除荷を行ってから荷重を再開した。4.5kN を荷重した後は除荷後に試験体が破壊するまで単調荷重を行った。Case2 では Case1 から初期ひび割れ発生荷重が約 4.5kN であることを確認することができたので, 1 ステップ目の荷重を 5kN とし, 2 ステップ目 3 ステップ目の荷重をそれぞれ 10kN, 15kN として同様の荷重を行った。15kN 荷重後は除荷後に試験体が破壊するまで単調荷重を行った。

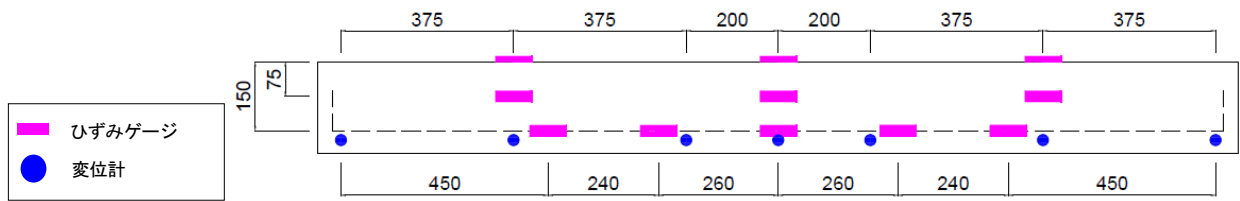


図-4 ひずみ, 変位測定位置 (単位 : mm)

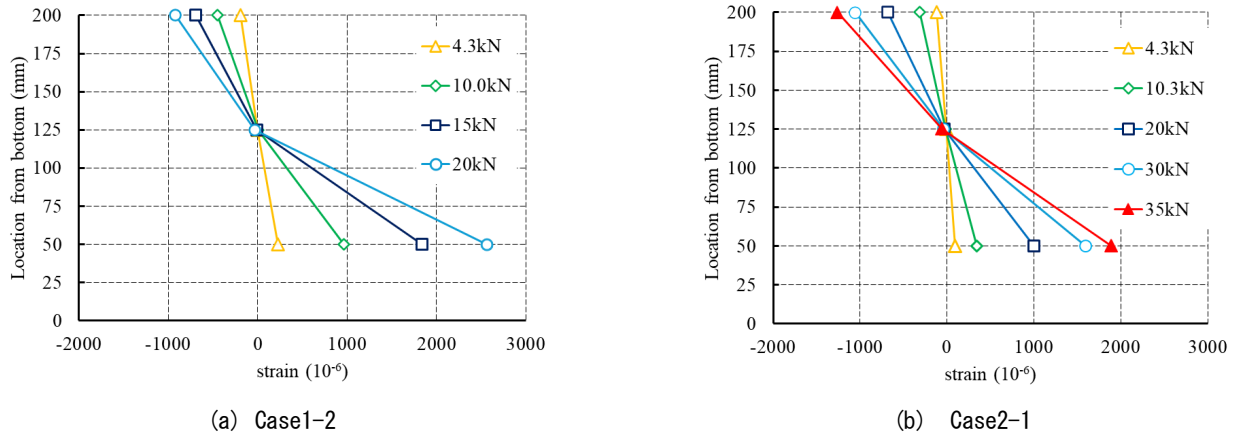


図-5 ひずみ分布 (試験体中央断面内)

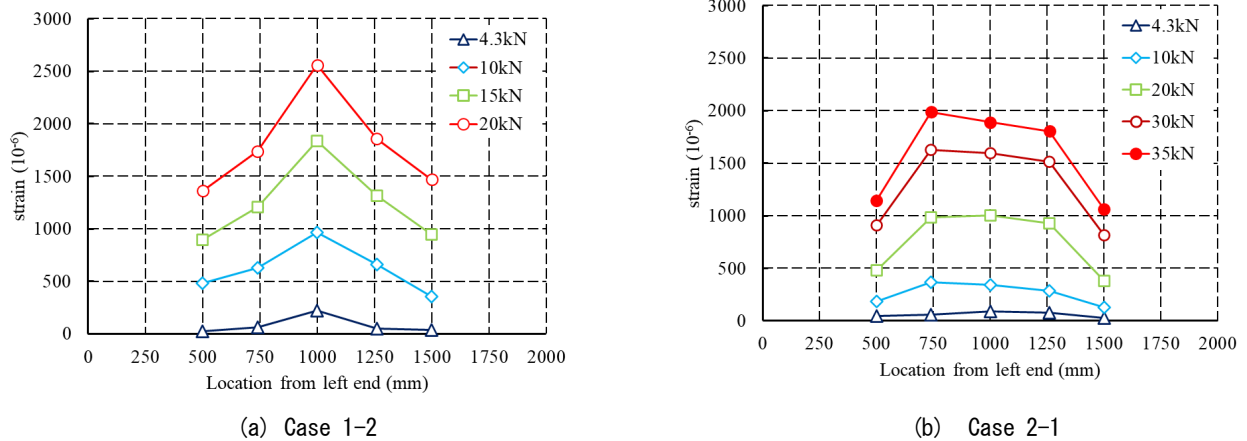


図-6 ひずみ分布 (軸方向 AFRP ロッド)

### 2.3 測定項目

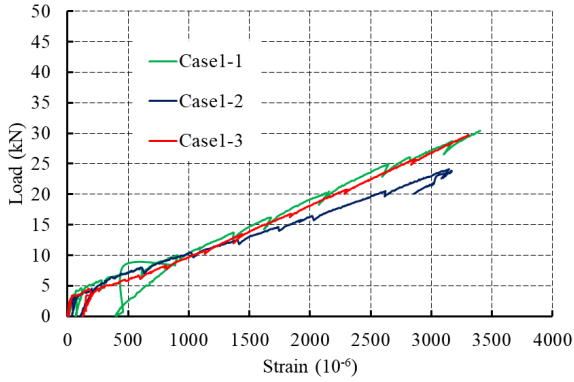
ひずみ・変位の測定位置を図-4に示す。コンクリートひずみの測定断面位置は、試験体の支間中央(支点から950mm)、せん断スパンの中央(支点から375mm)としている。断面内のひずみ測定位置は試験体の上面と有効高さの1/2の位置(上面から75mm)で計測した。AFRPロッドのひずみは支間中央、支間中央から両端に260mm、500mmの位置で計測した。変位は支間中央、荷重載荷点、せん断スパン中央、支点の7点について計測した。

## 3. 試験結果

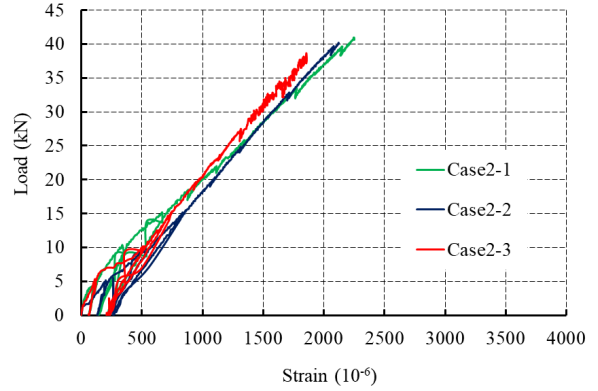
### 3.1 ひずみ分布

図-5に支間中央断面における高さ方向のひずみ分布の代表例を示す。Case1では荷重の増加に伴い AFRP ロ

ッドのひずみが過大になる傾向が認められるが、Case2では AFRP ロッドにおけるひずみが過大とはなっておらず、AFRP ロッドの断面積比を増加させたことによる効果が表れているものと考えられる。今回の荷重試験では概ね断面内の平面保持は確保できていたものと判断できる。図-6に AFRP ロッドにおけるひずみの分布を示す。Case1では支間中央で凸となる対称形の分布を確認することができたが、Case2では750mm~1250mmの範囲でひずみがほぼ一定になるという分布形状が確認された。荷重荷重20kNの時点で比較するとCase2の支間中央のひずみはCase1のひずみの40%程度となっており、AFRPの断面積比を増加させたことによる効果であると考えられる。ただし、750mmの位置と1250mmの位置では中央ほどは低減できていない(750mm:57%, 1250mm:51%)

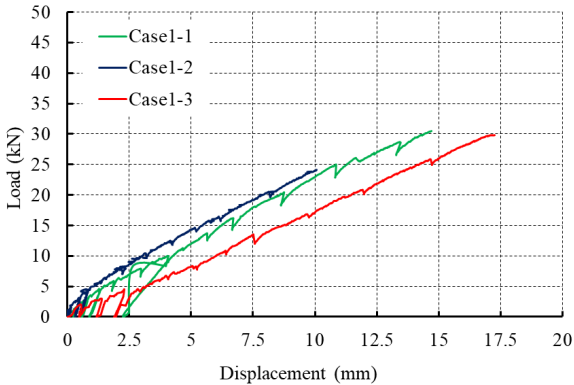


(a) Case 1

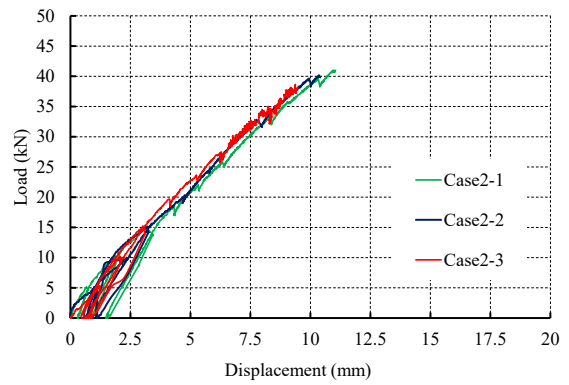


(b) Case 2

図-7 荷重-ひずみ関係 (支間中央 AFRP ロッド)

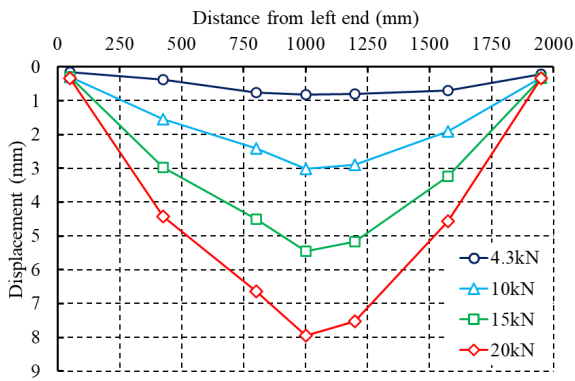


(a) Case 1

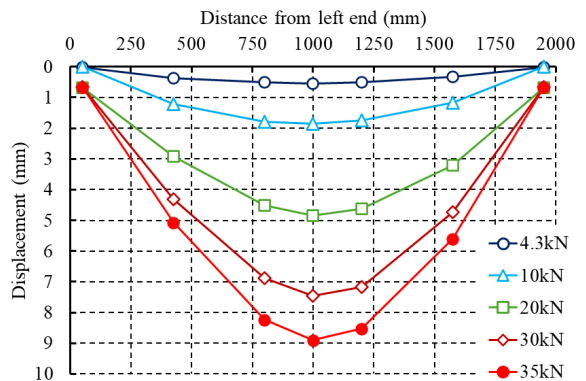


(b) Case 2

図-8 荷重-たわみ関係 (支間中央)



(a) Case1-2



(b) Case2-1

図-9 たわみ分布

ため検討が必要である。

### 3.2 荷重-ひずみ関係

図-7に Case1 と Case2の支間中央で計測された AFRP ロッドのひずみと荷重の関係を示す。Case1, Case2 ではともに荷重が4kN付近で線形の傾きに変化が生じているが、これは初期ひび割れが発生したためである。どの試験体でも初期ひび割れ発生以降は一定の傾きでひずみが単調増加していることが確認できる。また、荷重終了時点まで曲線に目立った変化はなく、発生しているひずみの値にも余裕があることから AFRP ロッド自体に余力は

あったものと判断できる。

### 3.2 荷重-変位関係

各試験体の支間中央における荷重-変位曲線を図-8に示す。今回の荷重試験では Case1, Case2 のすべての試験体で変位の増加に応じて荷重が単調増加する挙動を示した。このような挙動になるのは AFRP ロッドの基本的な性質として引張強度に至るまで降伏することがなく、さらにはひずみの値が想定される限界値よりもかなり小さいため、非線形的な挙動を示すことがなかったものと考えられる。

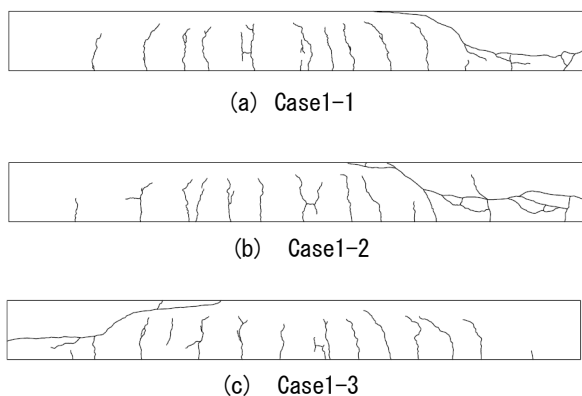


図-10 Case1 ひび割れ図

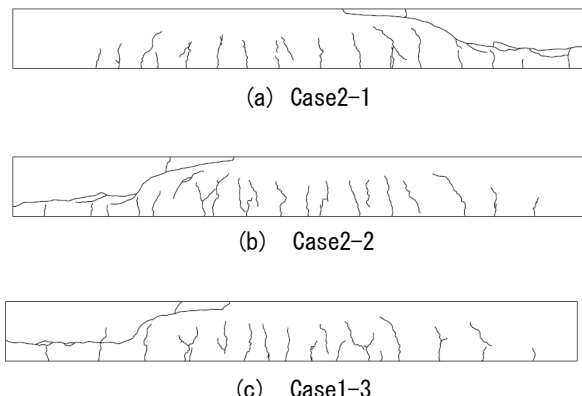
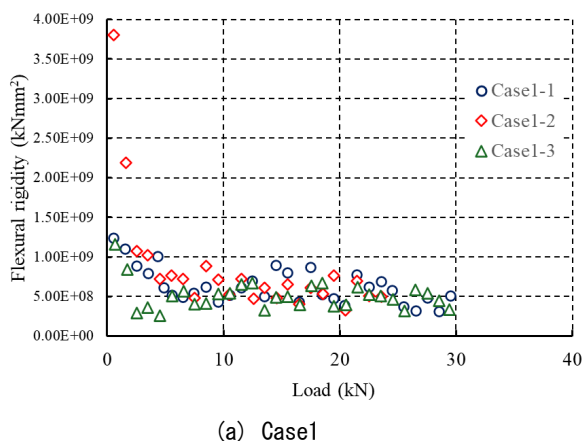
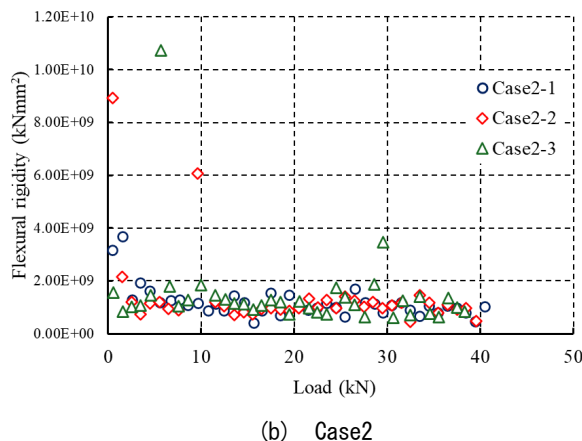


図-11 Case2 ひび割れ図



(a) Case1



(b) Case2

図-12 見かけの曲げ剛性

図-8(a)を確認すると Case1-1, Case1-2, Case1-3 はそれぞれ最大荷重 30.5kN, 24.1kN, 29.8kN を示し、その時点で最大変位として各々 14.7mm, 10.8mm, 17.3mm の変位を示した。Case1-1 と Case1-2 はほぼ同じ傾きの曲線となったが Case1-3 は傾きが他の 2 体と比較して小さくなっている。また、Case1-2 は Case1 の他の試験体と比較すると、最大荷重が 24.1kN とほかの試験体と比較して 20% 程度小さい値をとったが、これに関しては試験体の個体差であると判断している。

図-8(b)を確認すると、Case2 のすべての試験体はほぼ同じ荷重-たわみ曲線を示した。Case2-1 試験体では最大荷重 41kN で最大変位 11.1mm, Case2-2 試験体では最大荷重 39kN で最大変位 10.4mm, Case2-3 試験体では最大荷重 38kN で最大変位 9.5mm を示し、その直後に試験体上縁のコンクリートが圧壊したため試験を終了した。Case2 の各試験体では Case1 で確認できた最大荷重と比較して大きい最大荷重を確認できていることから、AFRP ロッドの断面積比を大きくすることで最大荷重の向上を期待できることが分かった。

### 3.3 変位の分布

Case1 と Case2 のたわみ分布の推移の代表的な例を図-9 に示す。これらの図を確認すると、いずれにおいて

も対称的な曲線を描いており、全体的に変形が進んでいることがわかる。また、各時点でのたわみの発生状況を比較してみると、10kN の時点で Case2 のたわみは Case1 のたわみの 67% 程度、20kN の時点で 63% 程度となっている。

### 3.4 ひび割れの発生状況、破壊形式

図-10, 図-11 に Case1, Case2 の試験終了時のひび割れ図をそれぞれ示す。今回の載荷試験では、すべての試験体で載荷初期には曲げひび割れが先行して進展していた。載荷荷重の増加に伴い、せん断スパン中央から載荷点に向かって斜めひび割れが進展し、最終的には斜めひび割れから支点方向に水平方向にひび割れが進展する引張付着破壊に伴う脆性的な破壊で試験が終了した。このことから、今回使用した試験体において側面のかぶり厚を増加することで最大荷重を増加させることができた可能性がある。

Case1 と Case2 の試験終了時におけるひび割れ図と破壊形式には大きな違いを確認することができず、梁断面に対する AFRP ロッドの断面積の比を大きくしたことによる梁の破壊形式に与える影響は確認できなかった。これは AFRP ロッドとコンクリートの間の付着破壊が支配的であったためと考えられる。

#### 4. AFRP 断面積比と曲げ剛性の関係

本研究では4点曲げ荷重で試験を実施しているため、試験体支間中央のたわみは次式で与えられる。

$$y_{max} = \frac{Pa}{24EI}(3l^2 - 4a^2) \quad (1)$$

ここで、 $y_{max}$ : 支間中央のたわみ (mm),  $P$ : 荷重 (N),  $l$ : 支間長 (mm),  $a$ : 支点から荷重点までの距離 (mm),  $E$ : 弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>),  $I$ : 断面2次モーメント (mm<sup>4</sup>)

(1) 式を変形すると次のようになり、見かけの曲げ剛性を求めることができる。

$$EI = \frac{Pa}{24y_{max}}(3l^2 - 4a^2) \quad (2)$$

この式を用いて求めた、試験中央における各試験体の曲げ剛性の変化を図-12に示す。この図を見ると一部に乱れはあるものの Case1, Case2 はともに一定の範囲の曲げ剛性を示していることがわかる。Case1 と Case2 との間にはどのような違いがあるのかを確認するためにそれぞれの平均と標準偏差を求めてみた結果を図-13に示す。平均では Case2 の剛性が Case1 の 1.83 倍、標準偏差は Case2 が Case1 の 1.52 倍となっている。今回の実験では AFRP の断面積比を変化させた結果として、断面積の変化量ほどではないにしても曲げ剛性を変化させることはできたものと考えている。

#### 5. まとめ

本研究では AFRP ロッドを使用した梁において、AFRP ロッドの断面積比による影響について荷重試験を通して調査を行った。

その結果として得られた知見を以下に示す。

- (1) Case2 は Case1 と比較して高い最大荷重を確認できたことから AFRP ロッドの断面積比を大きくすることで、耐荷力の向上が期待できる。
- (2) AFRP ロッドの断面積比が梁の破壊形式に与える影響は確認できなかった。

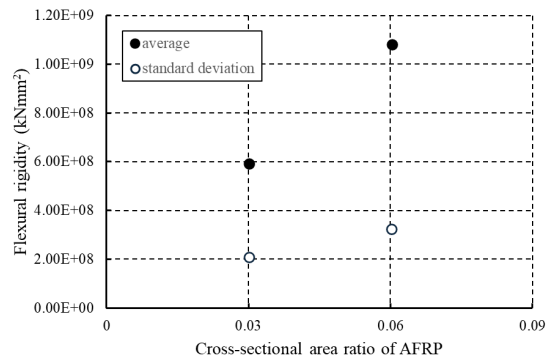


図-13 断面積比による曲げ剛性の変化 (平均値・標準偏差)

- (3) AFRP ロッドの断面積比を変化することで、梁の曲げ剛性を変化できることが確認された。

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり、(一社)東北地域づくり協会「R6 年度建設事業に関する技術開発支援事業」による助成を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 白戸真大, 藤田裕士, 高橋慶: 橋梁の架け替えに関する調査結果(V), 国総研資料 第 1112 号, 2020.6
- 2) 土木学会: FRP 橋梁—技術とその展望—, 土木学会, 2004.1
- 3) 瀬下椋太, 大西弘志, 北爪利玖, 小林宣博: AFRP ロッドを用いた T 形断面 RC 梁の側面かぶり厚が梁の構造性能に与える影響, 第 10 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2024.11
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 土木学会, 2022.12