

(45) AFRP ロッドを適用したT形断面RC梁のかぶり厚さが梁の破壊形態に与える影響に関する解析的検討

北爪 利玖¹・大西 弘志²・浅沼 峻³・瀬下 椋太⁴

¹ 学生会員 岩手大学大学院 総合科学研究科地域創生専攻（〒020-0114 岩手県盛岡市上田 4-3-5）

E-mail: g0123020@iwate-u.ac.jp

² 正会員 岩手大学教授 理工学部システム創成工学科（〒020-0114 岩手県盛岡市上田 4-3-5）

E-mail: onishi@iwate-u.ac.jp

³ 学生会員 岩手大学大学院 総合科学研究科地域創生専攻（〒020-0114 岩手県盛岡市上田 4-3-5）

E-mail: g0122003@iwate-u.ac.jp

⁴ 岩手大学 理工学部システム創成工学科（〒020-0114 岩手県盛岡市上田 4-3-5）

E-mail: s0820003@iwate-u.ac.jp

RC 構造物内の鉄筋腐食は、鉄筋自体が損傷を受けるとともに、構造物の性能に影響を与えるなど大きな問題となる。この問題を解決するために、著者らは鉄筋代替物として AFRP を採用した。AFRP は軽量で、耐食性に優れており、かぶり厚さを減らすことにより断面の減少の効果が期待できる。そこで、本研究では、AFRP ロッドを適用した T 形断面 RC 梁を対象に、AFRP ロッドに鉄筋と同等のかぶり厚さを設定した梁と梁側面のかぶり厚さを変更した梁を設計した。そして、側面のかぶり厚さの減少による梁の構造性能への影響に関して、FEM 解析による検討を実施した。特に本研究では T 形断面 RC 梁の AFRP ロッドとコンクリートの付着や、AFRP ロッドの定着部の破壊形態について検討する。

Key Words: AFRP, cover thickness, FEM analysis

1. はじめに

我が国の道路橋に使用される補強材は、鋼材が多くを占めており、それにより建設された構造物は重要な社会基盤の一部として整備されている。しかし、橋梁の架け替えに関する調査では RC 橋、PC 橋ともに上部構造の損傷による架け替えの割合が多く、その中でも塩害による鋼材の腐食が深刻となっている¹⁾。特に RC 構造物内の鉄筋の腐食は、鉄筋自体が損傷を受けるとともに、構造物の性能に影響を与えるなど大きな問題となる。この問題の抜本的な解決には材料自体を見直す必要があり、本研究では AFRP ロッドを鉄筋代替物として採用した。

AFRP ロッドは軽量で耐食性に優れているため、腐食性環境において AFRP ロッドを適用することは効果的である。そのため、既往研究では矩形断面やπ型断面 RC 梁などの RC 部材への AFRP ロッドの適用を検討してきた²⁾。図-1に AFRP ロッドを適用したπ型断面 RC 梁の静的載荷試験の様子を示す。さらに、耐食性に優れている



図-1 AFRP ロッドを適用したπ型断面 RC 梁の静的載荷試験

ことから、腐食性環境に対して確保する必要のあるかぶり厚さを RC 部材におけるかぶり厚さよりも減らすことが可能である。そのため、構造物の断面の減少、つまり

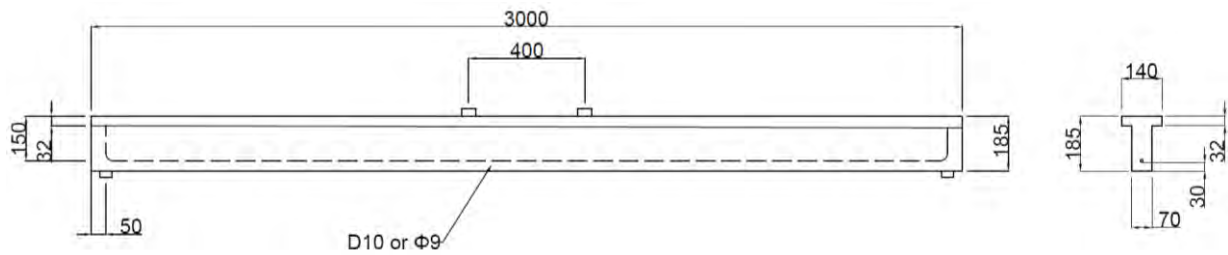


図-2 T形断面 RC 梁の寸法および配筋（かぶり厚さ 30 mm）

構造物自体の軽量化を図ることができる。したがって、構造物の軽量化に伴い、耐震性能および施工性、経済性の向上の効果も期待できる。

本研究では、T形断面 RC 梁を対象に、鉄筋と同等のかぶり厚さを設定した梁と、梁側面のかぶり厚さを変更した梁を設計した。そして、そのときの梁の耐力への影響に関して、FEM 解析を実施し検討した。さらに、T形断面 RC 梁のAFRP ロッドとコンクリートの付着やAFRP ロッドの定着部の破壊形態への影響も検討した。

2. T形断面 RC 梁の決定

図-2 に本研究で基準となる T形断面 RC 梁の諸元を示す。また、この試験体寸法は長さ 3000 mm、有効高さ 150 mm、せん断スパン比 8.33、かぶり厚さ 30 mm の梁である。また、フランジ幅は 140 mm、フランジ厚さは梁の中立軸位置と同じになるように 32 mm とした。また、補強材として、鉄筋は SD345 の D10、AFRP ロッドは $\phi 9$ を使用する。なお、梁側面のかぶり厚さは、道路橋示方書・同解説 III 編に記載のある鉄筋の最小かぶり厚さを参考にして、本研究では 30 mm を基準にかぶり厚さを増加させたモデルと減少させたモデルを作成した³⁾。したがって、補強材の種類ごとにかぶり厚さが 45 mm、30 mm、22.5 mm、15 mm の 4 種類のモデルについて作成し、合計 8 モデルの検討を実施した。また、実験を想定し、付着性の向上のため鉄筋端部にはフックを設置した。フックは支点部で鉄筋を直角に折り曲げる直角フックとし、フック端部の位置を中立軸位置の高さとした。

また、本研究における試験方法は 4 点曲げ試験とし、梁端部から 50 mm のところに支持を設けた。なお、荷重区間は 400 mm とした。

3. FEM 解析概要

本研究では、かぶり厚さが梁の耐力に及ぼす影響を検討するため、かぶり厚さをパラメータとし、4 点曲げ載

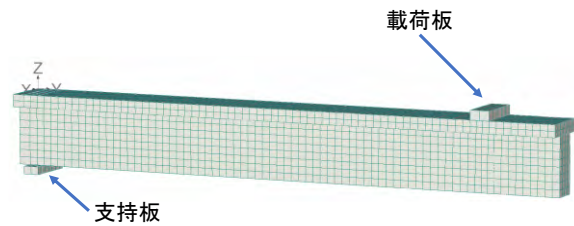


図-3 1/2 モデル外観

表-1 材料物性値

材料	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強度 破断強度 (N/mm ²)
コンクリート	25.0	32.0	
鉄筋	200		400
AFRP ロッド	68.6		1150

荷による FEM 解析を実施する。FEM 解析を行う際の解析プログラムとして、汎用非線形解析ソフト「ATENA 3D Ver 5.9.1」を使用した。図-3 にモデルの外観、表-1 に解析で使用する各材料の物性値をそれぞれ示す。モデルは ZX 平面を対称面として試験体の 1/2 モデルをソリッド要素で作成している。要素サイズは基本一辺 20 mm とし、要素数は 3450 である。

既往研究では、AFRP ロッドに珪砂の表面処理を施すことにより AFRP ロッドとコンクリートとの付着性が向上することが分かっている。そのため、今回の解析で用いる AFRP ロッドは珪砂処理を施したものをを用いることを想定する⁴⁾。そこで、珪砂処理を施した場合の付着条件について、本研究では ATENA において設定可能な CEB FIP Model code 1990 の付着応力-すべりモデルを用いる⁵⁾。本解析に適用した付着応力-すべりモデルを図-4 に示す。付着応力-すべりモデルの構成則は 6 点のプロットから曲線が構成されており、そのうち付着応力ピーク点と付着応力ピーク後の低下した付着応力点の 2 点を設定することで、他の 4 点も決定される。表-2 に本解析における各点の値を示す。なお、付着応力ピーク点および、付着応

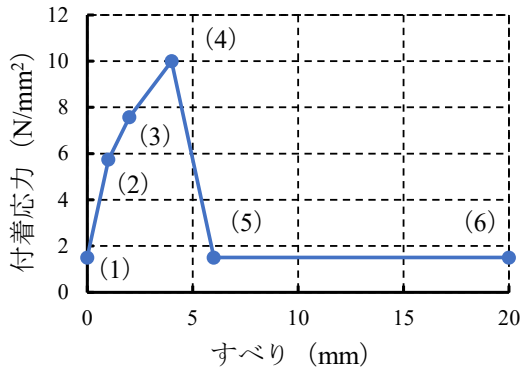


図4 付着応力-すべりモデル

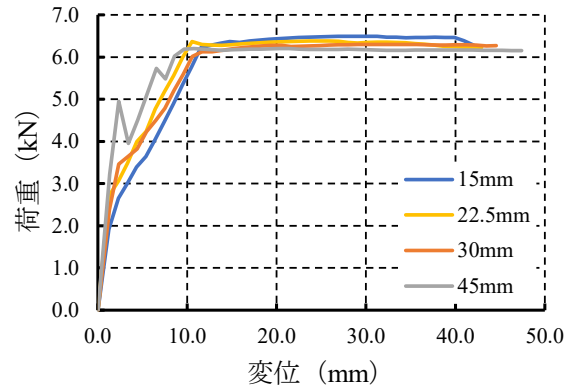


図5 RC梁の荷重-変位曲線

表2 構成則の各点におけるすべり量と付着応力

	すべり量 (mm)	付着応力 (N/mm ²)
(1)	0.00	1.50
(2)	1.00	5.74
(3)	2.00	7.58
(4)	4.00	10.0
(5)	6.00	1.50
(6)	20.0	1.50

表3 終局荷重と計算値の比較

かぶり厚さ (mm)	終局荷重 Pu (kN)	終局荷重の 計算値 Pcal (kN)	終局荷重と 計算値の比 (%)
30	6.3	6.7	5.7
45	6.2		7.2
22.5	6.2		7.2
15	6.3		5.7

力ピーク後の点に関しては、既往研究の両引き試験の結果をもとに定めた。また、既往の両引き試験の供試体の移動量をすべり量とみなし、最大付着応力は両引き試験のひび割れ性状に合うように決定した。

また、支持条件は単純支持とし、荷重条件は変位制御法を採用し、1ステップあたり、1mmの強制変位を与えた。解法には、Newton-Raphson法を採用した。

4. 解析結果

(1) T形断面 RC 梁の解析結果

T形断面 RC 梁の解析結果として荷重-変位曲線を図-5に示す。すべてのモデルにおいて、変位が約10mmから12.5mmで鉄筋が降伏し、変位が約40mmから45mm付近で終局に至っていることがわかる。T形断面 RC 梁では最大変位は多少の変化が生じたものの、かぶりを変化させても終局荷重に変化がほとんど生じていないことがわかる。

表-3に各かぶり厚さの終局荷重と等価矩形応力ブロック法により算出した計算値との比較を示す⁹⁾。すべてのモデルにおいて終局荷重と計算値の誤差は5.7%から7.2%であり、今回作成した解析モデルは概ね妥当であると判断できる。

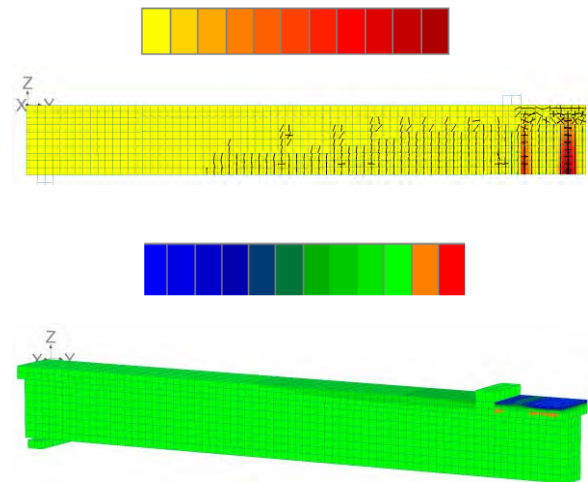


図6 RC梁モデルの終局時のひび割れ性状(単位:m)および最小主ひずみ分布(かぶり厚さ30mm)

解析結果の代表例として、図-6にかぶり厚さ30mmのT形断面 RC 梁モデルにおける終局時の鉄筋配置部(ZY断面)のひび割れ性状および梁の最小主ひずみ分布を示す。T形断面 RC 梁モデルでは載荷スパン内に幅の大きいひび割れが進展しており、最小主ひずみ分布に関しても、梁の圧縮縁に最小主ひずみが集中していることがわかる。これらの結果より、このT形断面 RC 梁のモデルは曲げ引張破壊による終局と考えられる。なお、他の

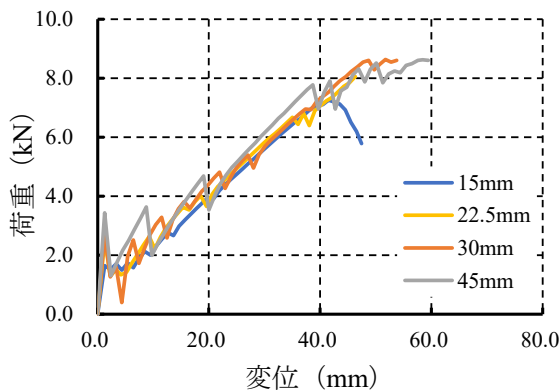


図-7 A-RC 梁の荷重-変位曲線

RC 梁モデルも同様のひび割れ性状や最小主ひずみ分布となった。

(2) T 形断面 A-RC 梁の解析結果

AFRP ロッドを適用した T 形断面 RC 梁（以下、AFRP ロッドを適用した RC 梁のことを A-RC 梁とする）の解析結果として図-7 に荷重-変位曲線を示す。かぶり厚さ 45 mm と 30 mm のモデルを比較すると、最大変位については 45 mm モデルは 59.5 mm、30 mm モデルは 53.8 mm と、多少の変化が生じたものの、最大荷重については両モデル 8.6 kN と変化はない。また、かぶり厚さ 22.5 mm のモデルを見ると、最大変位に関してはかぶり厚さ 45 mm のモデル、30 mm のモデルと比べると小さくなっているが、最大荷重に関しては、22.5 mm モデルは 8.1 kN であり、その差は 0.5 kN と大きな減少は見られないことがわかる。しかし、かぶり厚さ 15 mm のモデルでは、変位 41 mm 付近で荷重が急激に減少しており、最大荷重に関しても、他のモデルと比較すると最大で 1.3 kN 小さくなっており、かぶり厚さを 15 mm まで小さくすると最大荷重に大きな影響を与えることがわかる。

図-8 に終局時における各モデルのロッド配置部（ZY 断面）のひび割れ性状および梁の最小主ひずみ分布を示す。ひび割れ性状図より、かぶり厚さが小さくなるにつれ、幅の大きいひび割れが分散することがわかる。また、ロッド配置付近のひび割れはかぶりが小さくなるにつれ進展しており、特にかぶり厚さ 30 mm モデルと 15 mm モデルではロッド配置位置に沿った水平方向のひび割れが大きく進展している。

また終局時における梁側面の最小主ひずみ分布のコンター図をみると、かぶり厚さ 45 mm モデルでは、載荷区間部に最小主ひずみが集中して分布しているのに対し、他のモデルは梁のウェブ部に最小主ひずみが集中して分布していることがわかる。

また、各モデルのひび割れ性状と最小主ひずみより、

圧縮ひずみが分布しているところはひび割れ性状においても幅の大きいひび割れが進展していることがわかる。

これらの解析結果より、AFRP ロッドを適用した T 形断面 RC 梁のかぶり厚さ 45 mm モデルでは、圧縮縁に最小主ひずみが集中したことから、圧縮縁における圧縮破壊が起きていると考えられる。一方、かぶり厚さ 30 mm、22.5 mm モデルにおいて、荷重-変位曲線はかぶり厚さ 45 mm モデルと大きな違いは見られないものの、最小主ひずみ分布では、梁のウェブ部に圧縮ひずみが集中していたことから、梁のウェブ部の圧縮破壊が起きていると考えられる。さらに、かぶり厚さ 15 mm モデルにおいては、最小主ひずみ分布はかぶり厚さ 30 mm、22.5 mm モデルと同様に梁のウェブ部に圧縮ひずみが集中しているが、荷重-変位曲線は変位 41 mm 付近で荷重が急激に減少していること、ひび割れ性状図より、ロッド定着部にも水平方向に大きいひび割れが発生していることから、AFRP ロッドとコンクリートとの付着の低さによるせん断破壊を起していると考えられる。

以上の結果から、T 形断面 RC 梁ではすべてのモデルが曲げ引張破壊が生じたのに対し、AFRP ロッドを適用した T 形断面 RC 梁ではかぶり厚さによって、圧縮縁の圧縮破壊、ウェブ部の圧縮破壊、ロッド配置部に沿った水平方向のせん断破壊など破壊形態が異なった。この理由として、AFRP ロッドの材料の性質上、降伏点を持たないことや、弾性係数が 68.6 kN/mm² と小さいこと、AFRP ロッドが鉄筋と同等の付着力を確保できないなどが考えられる。

(3) T 形断面 RC 梁と T 形断面 A-RC 梁の比較

T 形断面 RC 梁と T 形断面 A-RC 梁の耐力の比較として、表-4 に各モデルの最大荷重と最大変位、RC 梁に対する A-RC 梁の耐力増加率および変位増加率を示す。すべてのモデルで鉄筋の代わりに AFRP ロッドを用いることで、曲げ耐力が 12.3% から 38.7% の曲げ耐力の向上が見られた。また、最大変位についても AFRP ロッドを適用することで、変位量が 7.93% から 25.5% 増加することがわかる。また、かぶり厚さ 15 mm の A-RC 梁モデルでは終局時に荷重が急激に低下する脆性的な破壊となったが、それでも、すべての RC 梁モデルよりも最大荷重は大きいことがわかる。

5. まとめ

本研究では、AFRP ロッドの優れた耐食性に着目し、AFRP ロッドを適用した T 形断面 RC 梁を対象に、かぶり厚さを変更したときに梁の耐荷性能に及ぼす影響について FEM 解析による検討を行った。本研究で得られた

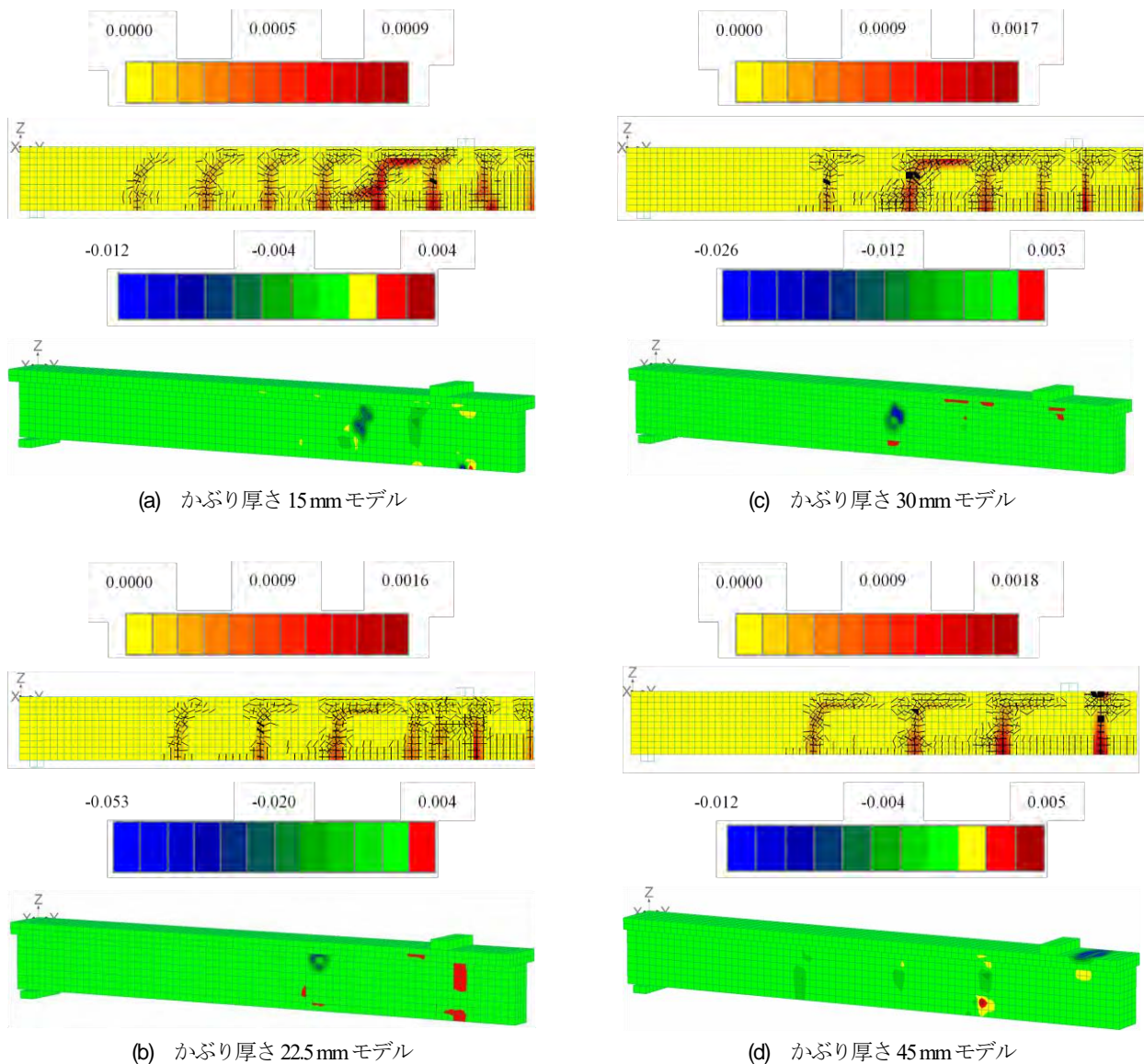


図-8 A-RC 梁モデルの終局時のひび割れ性状
(単位 : m) および最小主ひずみ分布

表-4 各モデルの最大荷重および最大変位

かぶり厚さ (mm)	RC 梁 最大荷重 (kN)	A-RC 梁 最大荷重 (kN)	RC 梁 最大変位 (mm)	A-RC 梁 最大変位 (mm)	耐力増加率 (%)	変位増加率 (%)
45	62	8.6	47.4	59.5	38.7	25.5
30	63	8.6	44.6	53.8	36.5	20.6
22.5	64	8.1	42.9	46.3	26.6	7.93
15	65	7.3	42.0	47.5	12.3	13.1

知見を以下にまとめる。

- (1) T形断面 RC 梁において鉄筋の代わりに AFRP ロッドを適用することで、かぶり厚さを 30 mm から 15 mm まで小さくしても、耐力は 12.3 % から 36.5 % の増加
- (2) AFRP ロッドを適用した T形断面 RC 梁においては、かぶり厚さ 15 mm で最大荷重が大きく減少していたことから、かぶり厚さ 15 mm まで小さくするとせん

が期待できる。

断による脆性的な破壊となり耐力が小さくなる可能性がある。

- (3) AFRP ロッドを適用した T 形断面 RC 梁のひび割れ性状, 最小主ひずみ分布より, 基準としたかぶり厚さ 30 mm でも梁のウェブ部に圧縮ひずみが集中し, ウェブの圧縮破壊を起こす可能性がある。
- (4) AFRP ロッドを適用した T 形断面 RC 梁では, かぶり厚さを 15 mm まで小さくすると, AFRP ロッドの付着性の低さから, ロッド配置位置に沿った方向にひび割れが発生し, それに伴いせん断破壊を起こす可能性がある。
- (5) AFRP ロッドを適用した T 形断面 RC 梁では, かぶり厚さを小さくすると破壊形態に大きな影響を与える。今後は, 実験を通して今回作成した解析モデルの妥当性を検討していくとともに, かぶり厚さを減少させたときの AFRP ロッドとコンクリートの付着性や AFRP ロッド定着部の破壊形態などについてより詳しく調査する。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 国土技術政策総合研究所資料, No.1112, 橋梁の架替に関する調査結果(V), pp.I-10, 2020.
- 2) 渡部洋平, 大西弘志, 出戸秀明, 天野順弘, 松原澄行: AFRP ロッドを適用した π 型断面 RC 梁の静的載荷による曲げ強度の検討, 第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集, pp.41-46, 2016.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編, pp.71, 2017.
- 4) 岡部航大, 大西弘志, 盛合将和, 岩根颯太郎, 松原澄行: AFRP ロッドとコンクリート部材の付着強度に関する解析的研究, 第 13 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, pp.232-239, 2019.
- 5) 株式会社 計算力学研究センター: ATENA 理論マニュアル, pp.76-78, 2010.
- 6) 吉川弘道: 第 2 版 鉄筋コンクリートの解析と設計-限界状態設計と性能設計法-, pp.88-101, 2004.

(Received August 25, 2023)

ANALYTICAL STUDY ON THE INFLUENCE OF COVER THICKNESS OF T-SHAPED CROSS-SECTION RC BEAMS WITH AFRP RODS ON THE FAILURE MODE OF THE BEAMS

Riku KITAZUME, Hiroshi ONISHI, Ryo ASANUMA and Ryota SESHIMO

Corrosion of steel bars in RC structures is a major problem because it can damage the bars themselves and affect the performance of the structure. The authors employed AFRP as a rebar substitute to solve this problem. AFRP is lightweight, has excellent corrosion resistance, and is expected to have the effect of reducing the cross section by reducing the cover. Therefore, in this study, beams were designed for T-shaped RC beams to which AFRP rods were applied: one with a cover thickness equivalent to that of steel bars on the AFRP rods and the other with a different cover thickness on the beam sides. Then, the authors performed a FEM analysis of the effect of the reduced lateral cover thickness on the structural performance of the beams. In particular, this study examines the adhesion between AFRP rods and concrete in T-section RC beams and the failure modes of the anchorage of AFRP rods.