(25) AFRPを活用した小型床組み構造に関する解析的検討

田島 周磨1・大西 弘志2・天野 順弘3

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 修士課程 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5) E-mail:g0120035@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 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5) E-mail:onishi@iwate-u. ac. jp

> > ³非会員 サカイ産業株式会社 繊維事業部 (〒427-8512 静岡県鳥田市細鳥1349-1)

我が国の社会基盤分野においては、様々な性能に優れている鉄筋コンクリート構造が広く用いられてい る.鉄筋コンクリート構造は補強材として炭素鋼を原料とする鉄筋を用いているため、供用期間の経過と ともに鉄筋の腐食を生じる場合がある。特に沿岸部において、鉄筋の腐食に伴うコンクリートの破損も多 く見られ、鉄筋コンクリート構造における代表的な損傷形態となっている。この問題を解決するため、既 往研究より鉄筋の代替物としてAFRP製のロッドを用いることを提案してきた。本論文では、AFRPを用い た小型の梁と薄型板材の組み合わせによる小型床組み構造の挙動等について、有限要素解析による検討を 実施した結果を報告する。

Key Words : AFRP, Floor system, Concrete member, Finite element analysis

1. はじめに

我が国における社会基盤構造物の材料として、安価で、 豊富な実績を有するなどの点から、鉄筋コンクリートが 広く利用されている.鉄筋コンクリートは、コンクリー トを鉄筋で補強することにより引張への耐性を強化して いる材料である.一方で、供用期間の経過とともに内部 の鉄筋に腐食が生じることがあるほか、鋼材が腐食しや すい沿岸部などでは鋼材腐食に伴うコンクリートの破損 も多く見られる.このような劣化・損傷は、構造物の長 寿命化の妨げになり、費用の増加へ繋がる.そこで著者 らは、鋼材腐食を根本的に解決する策として、耐食性に 優れるAFRP製のロッドを補強材として利用することを 考えた.AFRPロッドを図-1に示す.

また,国土技術政策総合研究所によると,昭和52年度 から平成28年度の間に行われた5回の橋梁の架替に関す る調査では,いずれの年度においても,下部構造の損傷 と比較して上部構造の損傷による架替が多くなっている ¹⁾.こうした背景を踏まえ,既往研究より床版部材に焦 点を当て,矩形断面およびπ型断面コンクリート床版へ のAFRPロッドの適用を検討してきた²⁾.

本論文ではAFRPロッドを利用した新たなコンクリー ト床部材として、小型のコンクリート梁と薄型板材を組 み合わせた床組み的構造を考える. 有限要素解析を実施 し、効率的な断面を形成する条件や実現可能性について 調査を行った.



図-1 AFRP ロッド

2. 比較対象とするRC床版

(1) 床版諸元の決定

一般的に、標準的なRC床版の床版支間は2.5 mから3.0 mである³. これを参考に、本論文で検討する床組構造の比較対象とするRC床版は床版支間を2.5 mとする. また、橋軸方向が単純支持、橋軸直角方向が弾性支持されている単純版を考えるが、4辺支持の場合は辺長比によって一方向スラブ・二方向スラブが決まる. RC床版諸元の決定は道路橋示方書⁴⁾(以下、道示)に準拠することから一方向スラブとするべく、支間長2.5 mに対して辺長比が2以上となるよう、長辺の長さを5.0 mとした.

次に、床版厚について、計画交通量が500台未満とし て計算したところ最小床版厚231 mmを得たため、235 mmとした.鉄筋配置について、複鉄筋配置とし圧縮側 には引張側の1/2の鉄筋を配置した.そして、コンクリ ートは設計基準強度の1/3、鉄筋は140 N/mm²に対して20 N/mm²ほど余裕を持たせた、許容応力度を用いて断面を 設計した.床版諸元を表-1に示す.設計基準強度はコン クリート標準示方書⁵⁾を参考に、弾性係数との関係式よ り算出した.表-2には、コンクリートおよび鉄筋の材料 特性値を示す.これらの値は、既往の研究²⁾で実施され た床版の押し抜きせん断試験に基づいた値を採用してい る.

(2) 有限要素モデルの概要

有限要素解析を行う際のプログラムとして,汎用非線 形解析ソフト「ATENA 3D ver 5.7.0」を使用した.モデル の外観を図-2に示す.橋軸直角方向を床版支間とするた め、長辺方向を単純支持とし、より実橋の挙動に近づけ るために短辺方向を弾性支持とした.載荷板について, 道示で規定されている輪荷重を想定した載荷面積と同様, 橋軸方向辺長を200 mm,橋軸直角方向辺長を500 mmと した.また,最大耐荷力を確認するために荷重条件とし て変位制御を採用し、1ステップ当たり0.5 mmの強制変 位条件を与えた.解法には、Newton-Raphson法を採用し た.

(3) 解析モデルの妥当性

RC床版の代表的な破壊性状である押し抜きせん断破 壊の特徴として、載荷板の端辺から45°の角度でせん断 破壊面を生ずることが挙げられる.図-3に示す、最大耐 荷力に到達した際の支間方向断面においても、載荷板の 端から、斜め方向にせん断ひずみが生じていることがわ かる.次に、荷重-変位曲線を図-4に示す.図-4中の理 論値の算定には、松井式[®]を用いた.解析モデルの最大 耐荷力は約1100 kN,理論値は1005 kNであり、その誤差

表-1 RC 床版諸元

橋軸方向	5000 mm
橋軸直角方向	2500 mm
床版厚	235 mm
鉄筋径	16 mm
主鉄筋間隔	80 mm
配力筋間隔	105 mm
かぶり厚	30 mm
床版支間方向	橋軸直角方向

表-2 材料特性值

材料	弹性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	
コンクリート	25.4	33.7		
鉄筋	195		550	







図-5 床組構造の概観

は約10%であった.また、荷重変位曲線の勾配が緩やか になることなく最大耐荷力に達しており、脆性的な破壊 をしたといえる.これらの結果から、破壊形式と破壊荷 重に妥当性があり、RC床版の挙動を再現できていると 考えられる.したがって、以降の解析においても同様の 材料構成則や支持条件等を設定した.

3. 小型床組構造の断面に関する検討

床組構造とは、床版部に作用した荷重を縦桁、床桁, 主桁の順に伝える上部構造^かで、一般的に鋼桁で構成さ れる.縦桁と床桁の接合方法として、縦桁を床桁の上に 乗せる構造および縦桁と床桁を同一断面内で繋ぐ構造が ある.しかしながら、本論文では床版支間方向のみに梁 を配置し、その上に板材を設置する構造を考えることと した.概観を図-5に示す.また、板材における圧縮側補 強筋の配置は、前章で設計したRC床版と同一にし、梁 部の補強筋については道路橋示方書を参考に、RC部材 における最小値である30 mmのかぶりで梁の中心に一本 配置した.

RC部材は鋼材腐食防止の観点から,適切にコンクリートかぶりを設けなければならない.一方で,AFRPは耐食性に優れることから,コンクリート量を減らし軽量化出来る可能性がある.したがって,前章で設計したRC床版を基準に,あらかじめ断面積を10%減少させた断面から断面形状を設定した.

(1) 板厚に関する検討

断面形状の設定の流れを以下に説明する.はじめに, 前章で設計したRC床版から10%減じた断面積を算出す る.次に,床組構造の部材全厚が235 mmで一定のもと, 板材厚さを75 mm,100 mm,125 mm,150 mm,175 mmと し,それぞれの梁の高さと,梁の総断面積を算出する. 梁の総断面積を梁の本数で除することで梁の幅も求まり, 梁の断面寸法が決定される.解析モデルの一覧を表-3に 示す.また,小型梁の設置方向について,橋軸方向に設 置し,床版橋の様に扱う場合と,橋軸直角方向に設置し, 鈑桁橋で利用する場合の2通りを考える.以降,前者を

表-3 解析モデル一覧

モデル	板材厚	梁高	梁幅	
No.	(mm)	(mm)	(mm)	
1	75	160	420	
2	100	135	410	
3	125	110	390	
4	150	85	360	
5	175	60	300	



図-6 荷重-変位曲線 (Type-A)

Type-Aとし,後者をType-Bとする.これらのモデルを解 析することで,板材と梁のどちらに断面積を割けば効率 的であるかを検討する.梁の本数については,1m当た りに5本の梁を設置するものとした.

a) Type-A

道示では支間長が長くなる場合,T荷重とL荷重のうち不利な応力を与える荷重を採用することが規定されている⁴.しかし,具体的な数値基準がないことから,Type-Bとの比較のためには同一条件にすべきと考え,T荷重を模した強制変位条件を与えて解析を実施した. Type-Aにおける,荷重-変位曲線を図-6に示す.30 kN前後までは線形的に荷重が増加し,それ以降も変位の増加とともに荷重も増加する傾向がみられた.変位が20 mmに到達した時点でのコンクリートの応力度がG_k/3=8.4を超過し始めたことから,変位が25 mmの時点で解析を停止した.また,板厚の増減による明確な差は確認できなかった.

b) Type-B

Type-Aと同様に解析を実施した結果を図-7に示す. いずれの場合においても、同じ傾向で荷重-変位曲線が 伸び、変位がおおよそ10 mmの時点で耐荷力が最大とな った.板厚の厚い方が耐荷力は大きくなる傾向を示し、 No.1モデルとNo.5モデルでは最大耐荷力に30 kN程度の差



図-7 荷重-変位曲線 (Type-B)

		-
モデル No.	中立軸(mm)	I (mm ⁴)
1	99.0	1.202×10 ¹⁰
2	94.2	1.329×10 ¹⁰
3	91.8	1.399×10 ¹⁰
4	88.2	1.486×10 ¹⁰
5	88.5	1.496×10 ¹⁰

表-4 Type-Bの断面二次モー	-メン	Ь
-------------------	-----	---

が生じた.次に、荷重変位曲線が横ばいとなり始めた時 点での、モデル下面のひび割れ性状を図-8に示す.矩形 断面のRC床版と同様に、四隅に向かってひび割れが伸 びていく傾向が確認された.また、Type-A,Bともに押し 抜きせん断破壊は生じていなかった.

ここで、Type-AとType-Bで大きな差が生じた要因は、 支間長の違いや支間直角方向の断面積が異なるためであ ると考える.また、Type-Aについて、実用的な構造とす るには大幅な形状変更が必要であることから、今後の検 討課題とし、以降はType-Bに焦点を絞る.

次に,各モデルの上面からの中立軸位置とその周りの 全断面有効断面二次モーメント(支間直角方向断面)を 算出した.計算結果を表-4に示す.各モデル間で,断面 二次モーメントに大きな差がないことから,最大耐荷力 の差は,板厚の増減による影響である可能性がある.な お,中立軸位置は自重と支持条件のみを考慮したステッ プにおける解析結果より求め,断面二次モーメントは, コンクリートの内部にAFRPロッドが在ることも考慮し ている.

(2) 梁の断面に関する検討

前節で実施した解析の結果から、板材が厚いほど耐荷 性能が向上する可能性が確認できた.本節では、断面二 次モーメントと耐荷力の関係を調査するために、板部材



図-8 下面のひび割れ性状

表-5 No.5 シリーズの各断面の諸元

モデル No.	梁高 (mm)	梁幅 (mm)	中立軸 (mm)	I (mm ⁴)
5	60	300	88.5	1.496×10 ¹⁰
5.1	90	200	93.5	2.335×10 ¹⁰
5.2	120	150	95.5	3.405×10 ¹⁰
5.3	150	120	98.2	4.919×10 ¹⁰
5.4	180	100	100.1	6.058×10 ¹⁰



図-9 荷重-変位曲線 (No.5 シリーズ)

の厚さと部材の総断面積が一定のもと、梁の断面を変更 して解析を実施した.

はじめに、最も大きな耐荷力を示したNo.5のモデルを 対象とした.モデルの梁形状、中立軸および断面二次モ ーメントを表-5に、各モデルの荷重-変位曲線を図-9に 示す.梁の断面が板材面鉛直方向に大きくなるにつれて 断面二次モーメントは大きくなり、最大耐荷力も大きく なった.この結果から、断面二次モーメントを大きくす ることでも、最大耐荷力の向上が図れる可能性があると 考える.

一方で、No.5シリーズのモデルは板材と梁の接合位置

モデル	板材厚 (mm)	梁形状 高さ×幅 (mm)	中立軸 (mm)	最大耐荷力 (kN)
No.2	100	160×340	101.1	331
No.3	125	195×220	124.1	367
No.4	150	360×85	137.6	447
No.4 (調整後)	125	300×85	130	325

表-6 中立軸位置改善後のモデル諸元

と、中立軸位置が大きく離れている.両者が構造的に一 体となって荷重を受け持つためには良好な接着が好まし く、接合部に過度なひずみが生じる断面は、実用的とは 言い難い. そこで、No.5シリーズの断面を変更した際の 中立軸位置の変化の傾向をもとに、中立軸位置が接合部 よりも上面側に位置するNo.2, No.3, No.4のモデルにつ いて、梁断面を変更し、中立軸位置の改善を試みた. 改 善後の断面形状および最大耐荷力を表-6に示す. No.5モ デルと同様に、梁断面を鉛直方向に大きくすることで、 断面二次モーメントが大きくなり、最大耐荷力が向上し た. No.4に関して、中立軸位置を接合部に完全に近づけ るのは困難であったが、解析を実施してきたいずれのモ デルよりも高い耐荷力を示したため、板厚を減じて調整 を図ったところ、板厚125 mmのときに中立軸位置130 mm, 最大耐荷力325 kNを得た. また, このときの断面 はRC床版と比較して約25%減少している.

(3) 更なる軽量化の検討

No.1およびNo5.4のモデルについて,梁の小型化や板材の薄型化を図り,中立軸位置の改善を試みるとともに, 更なる軽量化の可能性も検討した.

No.1のモデルにおいて,梁の高さが180 mm,幅が100 mmのとき,中立軸位置は約71 mmであり,おおよそ改善することができた.また,このときの断面減少率は40%程度だが,最大耐荷力は約180 kNであった.No.54のモデルにおいて,板厚を減少させたところ板厚が75 mmのときに中立軸位置が70 mmであった.このときの断面減少率はおおよそ50%であるものの,最大耐荷力は151 kNであった.両者ともに,補強材の配置や断面の最適化の余地は残すものの,これまでの解析では耐荷力の向上は数+ kN程度であったため,40%~50%の断面減少の実現に向けては,更なる検討が必要であると考える.

4. 使用性の調査

表-6に示したNo.2,3および調整後のNo.4に対し、衝撃



(a) 梁間に載荷する場合



(b) 梁上に載荷する場合

図-10 T荷重(140kN)の載荷位置

を考慮したT荷重140 kNを載荷し、応力度や変位を調査 する.載荷パターンを図-10に示す.単一での載荷(赤)、 1750 mm間隔で2組の載荷(青)の2パターンを考える.加 えて、床版中央部の梁間に載荷する場合(a)と、中央部に 最も近い梁の上に載荷する場合(b)を設定する.したが って、T荷重の載荷パターンは4パターンである.解析 結果を表-7に示す.いずれのモデルにおいても、コンク リートの最大圧縮応力度はσ_k/3=8.4≧を満たした.また、 床版の変位量については道示に制限値の明記がされてい ないため、参考としてRC床版の変位量との比を算出し た.比較には、a-1パターンとa-2パターン載荷時の変位 を用いた.断面の減少や補強材の弾性係数の違いによっ て、RC床版よりも変位は大きくなるものの、使用性に は影響がないといえる結果であった.図-11には、ひび

モデル 載荷パターン (位置-組数)		橋軸方向応力 (N/mm ²)		橋軸直角方向応力 (N/mm ²)		変位 (mm)	RC 変位 との比
	(,	51張		51張		()	
	a-1	0.84	-3.20	2.58	-7.36	0.59	1.55
No 2	a-2	1.70	-2.20	2.61	-4.20	0.50	1.61
INO.2	b-1	1.38	-2.78	2.70	-7.54	0.56	1.47
	b-2	1.54	-1.88	2.79	-4.35	0.48	1.55
No.3	a-1	1.01	-2.70	2.59	-5.86	0.47	1.24
	a-2	1.49	-1.99	2.71	-3.36	0.39	1.25
	b-1	1.59	-2.24	2.24	-6.11	0.44	1.16
	b-2	1.68	-1.65	2.77	-3.53	0.38	1.23
No.4 (調整後)	a-1	1.51	-2.86	2.67	-5.68	0.52	1.37
	a-2	1.24	-2.26	2.60	-3.37	0.43	1.39
	b-1	1.68	-2.31	2.35	-5.86	0.48	1.26
	b-2	1.67	-1.97	2.59	-3.58	0.42	1.35

表-7 T荷重載荷時の応力度と変位

割れの様子を示す.載荷位置に近い梁に曲げひび割れが 発生しているが、その幅は最大でも0.06 mm程であった. RC構造の曲げひび割れ幅限界値について、耐久性の観 点からは0.005c (cはかぶり)、使用性の観点からは0.3 mm 程度とされている[®]. AFRPが優れた耐食性を有すること、 限界値に対して十分な余裕があることから、適切な補強 材配置を行えば大きな問題ではないと考えられる.以上 より、通常のRC床版と比較して10~25%程度の軽量化 を図れる可能性を確認できた.



図-11 T荷重載荷時の下面の様子

5. まとめ

既往の研究より,RC構造物の代表的な損傷である鋼 材腐食の根本的な解決策として,耐食性に優れるAFRP の利用に着目してきた.本論文では,RC床部材として, AFRPロッドを補強材とする小型梁と薄版を組み合わせ た構造について,有限要素解析を用いて検討を行った. 以下に,まとめを示す.

(1) 断面を決定する際は、板材厚さが大きいこと、部材の断面二次モーメントが大きいことが有効であることを確認した.

(2) 梁の断面を変更することで、中立軸位置を調整することが出来るほか、耐荷力の向上を図れる.

(3) 同規模のRC床版と比較して、25%程度軽量化できる 可能性がある.

今後,より適切な補強材の配筋や断面を検討すること で更なる軽量化を試みるとともに、実用化に向けて検証 を進めていく.

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所:橋梁の架替に関する 調査結果(V), pp.1-6,2020.
- 2)岩根颯太郎,大西弘志,天野順弘,松原澄行:AFRPロッド を適用した RC 床版の耐力と付着強度の関係,FRP 複合構 造・橋梁に関するシンポジウム,2018.
- 3)日本橋梁建設協会:'11デザインデータブック, pp.67, 2011.
- 4) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 H30.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], pp.43, 2017.
- 6) 松井 繁之:道路橋床版 設計・施工と維持管理, pp. 44-45, 森北出版, 2007.
- 7) 宮本裕:橋梁工学 第3版, pp.114-115, 技報堂出版, 2017.
- 8) 土木学会 関西支部: コンクリート構造の設計・施工・維持 管理の基本, pp.87, 2014.

(Received September 10, 2021)

ANALYTICAL STUDY ON CONCRETE FLOOR SYSTEM REINFORCED WITH AFRP

Shuma TASHIMA, Hiroshi ONISHI and Norihiro AMANO

In Japan, Reinforced concrete has been widely used for Infrastructures. However, a lot of these age in recent years. One of the typical states of damage to reinforced concrete is the steel corrosion and associated concrete damage. To solve this ploblem fundamentally, the authors have considered using Aramid Fiber Reinforced Plastics (AFRP) as a reinforcement for concrete, taking its advantage of corrosion resistance.

In this paper, the authors conduct a finite element analysis to investigate the section layout and possibility of weight reduction, to propose a floor system composed of concrete beams and slab reinforced by AFRP rod.