論文 鋼板・CF シートで補強された RC 梁の非線形挙動解析

古賀掲維*1・松田 浩*2・林山 豊*3・佐川康貴*4

要旨:コンクリート構造物の補修・補強工法として,鋼板,CFシートを補強材としてRC はりに設置する工法がある。両工法とも,実施工にも広く採用されており,その耐荷性能 に関して多くの実験的研究が行われている。実験では剥離破壊が終局限界状態となる事例 が報告されており,種々の補強材を用いてRCはりを補強する場合の最適補強設計法を確 立するためには,剥離現象について十分解明する必要がある。本研究では,鋼板・CFシー トで補強されたRCはりのひび割れ発生から剥離挙動まで含めた破壊挙動を非線形有限要 素法によって解析を行い実験結果と比較することによって解析法の妥当性を検証した。 キーワード:RCはり,鋼板,CFシート,剥離挙動,非線形有限要素法

1. はじめに

近年,海岸付近の塩害によるコンクリートの 劣化をはじめとして,融雪剤によるコンクリー ト床版の劣化,鉄筋の腐食膨張によるコンク リート片の剥落など,厳しい環境下だけではな く通常の環境下でのコンクリート構造物の耐久 性に対する信頼性が問題視されるようになって きた。また,これまでに建設されてきた多くの コンクリート構造物は耐用年数に達し補修の段 階を迎えており,既設道路橋のコンクリート床 版を補修・補強する必要に迫られている。

筆者らはこれまで PIC 薄板を曲げ引張縁およ び曲げ圧縮縁に設置した RC はりを製作し,ひ び割れ発生から破壊に至るまでの非線形挙動に ついて実験および解析により検討を行ってきた ¹⁾。 PIC 薄板と RC 部材の接合面は PIC 板表面 を粗面仕上げしているため,実験でも接合部か らの剥離は生じなかった。したがって,解析に おいても完全付着状態と仮定して有限要素解析 を実施した。有限要素解析結果は実験結果をよ くシミュレートできることが確認された。

一方,鋼板および CF シート接着工法は既設

RC 構造物の表面にエポキシ樹脂を用いて鋼板 や CF シートを接着する工法である。両工法と も鋼板や CF シートが剥離して破壊する場合が あり,剥離によって補強部材の終局耐力が決定 されるために,剥離現象について十分に解明す る必要がある^{2)~4)}。

本研究は,種々の補強材を用いて RC はりを 補強する場合の最適補強設計法を確立するこ とを最終目的とし,まず鋼板及び CF シートを 接着した RC はりの載荷実験を 2 次元有限要素 解析によりシミュレートすることを試みたもの である。有限要素解析結果は実験結果をよくシ ミュレートできることが確認された。

2. 実験概要

2.1 鋼板を接着した RC はり

鋼板接着により補強された RC 梁の力学的 性質を明らかにすることを目的として曲げ載 荷実験³⁾が実施された。図-1に供試体形状寸 法,表-1に供試体の諸元,また表-2に使用材 料の物性値を示す。供試体は図-1に示すよう に,200×250×2100mm(スパン長:1900mm)で

- *1 長崎大学講師 大学教育機能開発センター 修士(工学) (正会員)
- *2 長崎大学助教授 工学部構造工学科 工博 (正会員)
- *3 長崎大学大学院生 生産科学研究科環境システム工学専攻
- *4 九州大学助手 工学研究院建設デザイン部門 博士(工学) (正会員)

ある。供試体は RC はりの曲げ引張縁に鋼板を エポキシ樹脂で接着させたものであり,表-1 に示すように RC 部材の曲げ引張縁に鋼板の厚 さおよび接着長が異なっている。また,比較の 基準となる無補強 RC はりも含まれている.

表 -1 の供試体呼び名で,Nは比較の基準と なる無補強RCはり,PおよびPSはRC梁の 曲げ引張縁にエポキシ樹脂にて鋼板を接着補強 したRCはりを示す。

PSシリーズの供試体は,曲げモーメントが 最大となる載荷点直下より支点方向へはり高さ の1.5倍(250×1.5=375mm)の長さを定着長と し,鋼板接着全長は900mmである。

Pシリーズの供試体の鋼板接着長は,コン クリートの圧壊時まで鋼板端部で剥離を生じ なかった過去の実験結果²⁾より定めた。す なわち,梁高200mm,幅100mm,スパン長 1500mmのRC梁に長さ1400mm,幅50mmの 鋼板を定着して曲げ載荷を行った実験を参考に したもので,コンクリートの圧壊時にも鋼板端 部で剥離を生じなかった供試体である。

鋼板補強供試体のうち PS-1 および P-1 は, N-2 に主鉄筋1本分に相当する断面積の鋼板を 接着されている。したがって鋼材量は N-1 と同 量である。また, PS-2 および P-2 は主鉄筋2 本分に相当する鋼板が接着されている。

2.2 CF シートを接着した RC はり

CFRP 接着工法により曲げ補強した曲げ破 壊先行型の RC 梁を用い,載荷時のせん断スパ ン比と CF シート補強量を変化させた曲げ載荷 試験が実施された⁴⁾。表 –3 に実験供試体の諸 元,図 –2 に実験供試体の概略図を示す。

表-3に示す実験パラメータと各試験体の破 壊形状,ひびわれ状況を考察することにより, 各種破壊パターンの分類と補強効果について 検討が行なわれている⁴⁾。実験供試体は無補 強RC梁,また炭素繊維シートを1層,2層, 3層と補強量を変化させたもの,さらに,炭素 繊維シートを1層貼付した供試体のせん断スパ ン比を変化させたもの,計7体である。



表-1 供試体諸元 (単位:mm,N/mm²)

供試体	鋼板 (SS400)		主鉄筋		備考	
呼び名	l(mm)	t(mm)	f_y	SD295	f_y	
N-1	_	_	_	3D16		無補強
N-2						RC 梁
PS-1	900	2.3				鋼板の
PS-2	900	4.5	243	2D16	337	剥離あり
P-1	1800	2.3				鋼板の
P-2	1800	4.5				剥離なし

表 -2 材料物性值 (単位:mm,N/mm²)

	鋼材種類	引張強度	降伏強度	弾性係数
鋼材	鉄筋 D16	483	337	1.76×10^{5}
	鋼板 t=2.3mm	435	243	$1.93{ imes}10^5$
	鋼板 t=4.5mm	434	285	$1.93{ imes}10^5$
コンクリート	圧縮強度	引張強度	弾性係数	
	38.8	2.93	2.0×10^{4}	
エポキシ樹脂	圧縮強度	引張強度	引張せん断強度	弾性係数
	82.3	56.0	15.5	2390



表 -3 供試体諸元 (単位:mm,N/mm²)

			, , ,
供試体	補強量	せん断スパン	せん断スパン比
呼名		a(mm)	a/d
case1	無補強	1000	4.4
case2			
case3	1層	800	3.56
case4		700	3.11
case5		550	2.44
case6	2 層	1000	4.44
case7	3層		

表-4 材料物性值 (単位:mm,N/mm²)

CFシート	引張強度	設計厚さ	弾性係数	目付量
	3.48×10^{3}	0.167	2.30×10^{5}	300
鉄筋	鉄筋の種類	降伏強度	弾性係数	
	SD295, D13	356	2.0×10^{5}	
コンクリート	引張強度	圧縮強度	弾性係数	供試体の種類
	2.65	31.3	2.35×10^{4}	case1, 2, 3, 4
	2.85	39.0	$2.85{ imes}10^4$	case 5, 6, 7

表-4に実験供試体に使用されている材料の 物性値を示す。

3. 実験結果

3.1 鋼板を接着した RC はり²⁾

PS供試体の場合,初期ひびわれの発生位置 はスパン中央付近であったが,荷重が増加する と鋼板先端のRCはり下縁にも曲げひびわれが 発生した。鋼板先端に発生したひびわれは荷重 の増加に伴って進展し,斜めひびわれを形成し スパン中央付近のひびわれよりも早い時期に 圧縮域に達した。鋼板は,斜めひびわれの進展 中に鋼板端部付近の約200mmの範囲でコンク リート面からはく離した。Pシリーズの供試体 の場合,曲げモーメントが最大となるスパン中 央付近で初期ひびわれが発生したのち,鋼板の 降伏,主鉄筋の降伏,上縁コンクリートの圧壊 に至る曲げ破壊のプロセスを示し,鋼板のはく 離は見られなかった。

図 -3(a),(b) に PS-1 および PS-2 供試体にお ける鋼板端部ではく離が発生した時点でのひび われ状況を示す。同図より, PSシリーズの供 試体においては,鋼板端部に発生したひびわれ はスパン中央付近に発生したひびわれよりも進 展が早いことがわかる。

3.2 CF シートを接着した RC はり⁴)

無補強供試体 case1 は,鉄筋降伏後にコンク リートが圧壊する一般的な曲げ破壊性状を示し た。 CF シートで接着補強された供試体 (case2 ~ case7) は,鉄筋降伏後も CF シートが引張力 を負担し, case1 と異なる破壊性状を示した。

図 -4(a),(b) に載荷実験後の case1, case2 供試 体のひびわれ分布を示す。なお, CF シートを 接着補強した供試体は, CF シートの片側が全 面剥離した時点で載荷を終えている。剥離面は すべて表層部の凝集破壊であった。

- 4. 解析概要
- 4.1 解析モデル
- (1) 有限要素モデル

本解析では,4節点平面ひずみ要素及び4節 点平面ひずみリバー要素を用いて解析モデルを 作成した。解析モデルにおけるコンクリート部 の要素サイズは約 2cm×2cm である。

(2) 鉄筋とコンクリートの付着領域

安らは,鉄筋の付着領域内(以後, RC zone と略)と付着領域外(以後, PL zoneと略)にお いて,コンクートのテンションスティフニング





図-4 ひびわれ発生状況 (CF シート 接着)

	PL zone
\mathbb{Z}	
R	

 $\boxtimes -5$ RC zone \succeq PL zone

効果の程度に違いがあることに注目し,異なる 構成則をもつコンクリート要素を混在させたモ デルを提案している⁸⁾。その提案の中で,RC zoneの範囲は,低鉄筋比,または,大規模RC 構造物のせん断強度に影響し,いわゆる寸法効 果の要因の一つとなることを論じている。これ らの点を鑑み,本解析モデルでは,安らの提案 した RC zone と PL zoneを考慮したモデルを採 用した。図 –5 に解析モデルにおける RC zone と PL zoneを示す。

RC zone 範囲の決定にあたっては,安らの提 案に従い,式(1)及び式(2)を用いた。

$$h_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot d_b \cdot \sqrt{\frac{f_y}{f_t}} \tag{1}$$

$$K = \sqrt{\frac{t_c - d_b}{5.5 \cdot d_b}} \tag{2}$$

ここで, d_b は鉄筋径, f_y は鉄筋降伏強度, f_t はコンクリート引張強度, t_c はコンクリートか ぶり厚さである。

式(1)でRC zoneの最大高さを算出し,式 (2)のコンクリートかぶり厚さと鉄筋径で決定 される補正係数を乗じることによりRC zone 範囲が決定される。図-6は,RC zoneの決定 法に関する概略を示す。図-6(a)には無補強 RCはりの場合,図-6(b)には補強材が設置さ れた場合の決定法を示している。図-6(b)に示 すように,異種材料が設置された場合において は,補正係数を算定する際に,異種材料とコン クリートの弾性係数比,および,引張強度比を 考慮してコンクリート断面積に換算し,コンク リートかぶり厚の一部と仮定して決定した。

(3) 構成則

本解析では,鉄筋及び引張域コンクリートの RC zoneの構成則に,ひび割れた RC 部材の一 軸引張モデルから算出した鉄筋とコンクリート の平均応力 - 平均ひずみ関係を採用した^{6),7)}。 また,引張域コンクリートの PL zoneの構成 則は,破壊エネルギーをほぼ無視できるものと し,引張強度到達以降で急激に荷重が低下する 特性を定義した。コンクリート圧縮域に関して は,要素寸法,および破壊エネルギーを考慮し たひずみ軟化モデルを採用した⁹⁾。なお,破壊 エネルギーおよびコンクリートの終局ひずみの 算定には式(3),(4)を使用した。

 $G_{fc} = 8770 \cdot (f_c)^{0.5} \tag{3}$

$$\epsilon_m = \frac{G_{fc}/f_c}{\ell_{eq}} + \frac{\epsilon_0}{2} \tag{4}$$

ここに, G_{fc} はコンクリートの圧縮破壊エネル ギー, ϵ_m は終局ひずみ, f_c はコンクリート圧 縮強度, $\ell_{eq} = \sqrt{要素面積}$ は要素の等価長さ, ϵ_0 は圧縮強度時のひずみであり, G_{fc} の単位は N/mである。

以上の諸定義から作成した構成則を図 –7 に 示す。同図は一例として,実験供試体 P-2の構 成則を示している。



(4) 鋼板・CFシートとコンクリートの接着について

本解析では、鋼板との接着を接触問題と考 え、剥離現象を接触問題における節点解離とし てモデル化した。解離判定には、節点における 応力を用い、コンクリートの主応力が引張強度 以下になった場合に剥離と判定した。CFシー トの場合も同様なモデル化を行った。しかし、 CFシートを接着したモデルの場合、荷重変形 挙動はほぼシミュレートできたが、ひび割れ発 生に伴って生じるピーリング作用をシミュレー トできなかった。

5. 解析結果

5.1 鋼板を接着した RC はり

図 -8,図-9は解析によって得られた PS-1 供試体の変形図,鋼板端部の鋼板剥離状況図 である。図 -9より, PS-1供試体において,実 験と同様に鋼板端部から剥離が生じているのが 確認できる。鋼板端部の剥離部分の応力状態よ り,鋼板の剥離はせん断ずれが原因ではなく, コンクリートとエポキシ層に生じた法線方向の 引張力がコンクリートの引張強度以上となった ために生じていることが確認された。

図-10(a) ~ (d) は解析によって得られた N-1, N-2, PS-1, P-1 供試体の荷重 - 変位曲線を実 験結果と比較したものである。図-10(a) ~ (d) よりわかるように,無補強 N-1, N-2 及び鋼板 の剥離が生じなかった P-1 供試体では本解析結 果は実験結果とほぼ一致しているが,鋼板の剥 離が生じた PS-1 供試体では,鋼板の剥離まで は解析結果と実験結果がほぼ一致しているが, 鋼板の剥離後は剥離が急速に進展し,解が収束 せず計算が終了した。

5.2 CF シートを接着した RC はり

図-11,図-12は解析によって得られた case2供試体の変形図,ひび割れ開口部のCF シート剥離状況図であり,図-13(a),(b)は解析 によって得られた case1, case2供試体の荷重 -変位曲線を実験結果と比較したものである。図 -12をみると,わずかながらひび割れ開口部に おいて CF シートとコンクリートの剥離が生じ ているが,解析自体にはあまり影響せず,実験 のように CF シート片側が全面剥離するという ことはなかった。図-13の荷重 - 変位曲線をみ ても,耐荷力が急激に減少したりすることはな く,最終的にはり上面でコンクリートが圧壊し 解析が終了した。





図-10 荷重とたわみの関係 (鋼板)





図-13 荷重とたわみの関係 (CF シート)

6. 考察及びまとめ

本研究では,種々の補強材を用いて RC はり を補強する場合の最適補強設計法を確立するこ とを最終目的とし,鋼板・CF シートを接着し た RC はりの載荷実験を2次元有限要素解析に よりシミュレートすることを試みた。本研究成 果は以下のようにまとめられる。

- 1) 無補強はり及び鋼板を接着した RC はりに おいて,ひび割れた鉄筋コンクリートの平 均応力 – 平均ひずみ関係及び鉄筋の付着領 域を考慮したモデル化を行うことにより, ひび割れ発生・進展状況を精度よくシミュ レートションすることができた。
- 3) 鋼板を接着した RC はりにおいて,鋼板と コンクリート間の解離判定を行うことに よって,鋼板の剥離現象をシミュレーショ ンすることができた。
- 3) 鋼板を接着した RC はりでは,剥離の発生 は鋼板の接着長に依存しており,接着長が 長くなれば,剥離は生じないことが解析で も確認された。
- 4) CF シートを接着した RC はりにおいて, わずかながら, CF シートとコンクリート

との剥離を確認できたが,実験のような シート片側の全面的は剥離には至らず,荷 重-たわみ曲線においても,シート剥離に よる耐力低下は認められなかった。

 5) CF シートで補強した RC はりの終局状態 を精度よくシミュレートするためには、 ピーリング作用を正確に再現できるモデル を検討する必要がある。

あとがき

ショーボンド建設(株)の佐野正氏, 岳尾弘 洋氏には, 鋼板接着 RC はり, CF シート接着 RC 梁の実験データを提供して頂いた。ここに 記して謝意を表します。

参考文献

- 松田浩,彦坂熙,鶴田健,出光隆,崎山 毅,山口浩平:高耐久性埋設型枠接合部を ひび割れ誘導目地としたRC構造物のひ び割れ解析,構造工学論文集,Vol.44A, pp.47-54,1998
- 2) 佐野正:鋼板接着によるコンクリート構造 物の補強設計法に関する研究,東北大学学 位論文,1996
- 3) 佐野正,三浦尚:鋼板接着によるコンク リート部材の補強設計法に関する研究,土 木学会論文集,No.550/V-33, pp.117-129, 1996
- 4) 岳尾弘洋,松下博通,佐川康貴,牛込敏幸: せん断スパン比を変化させた CFRP 補強梁の曲げ載荷実験,コンクリート工 学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.205-210, 1999
- 5) 大倉一郎,福井唯夫,中村圭吾,村上泰 三:炭素繊維シートによる鋼板応力の低下 とはく離せん断応力, 土木学会論文集, No.689, I-57, pp.239-249, 2001.10
- 6) 岡村甫・前川宏一:鉄筋コンクリートの非 線形解析と構成則,技報堂,1991
- 7) 篠原賢至,島弘:一軸鉄筋コンクリート部 材におけるひびわれ発生過程および引張剛 性の解析,コンクリート工学年次論文報告 集, Vol.11, No.2, pp.159-164, 1989.
- Xuehui AN, et-al: Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, CONCRETE LIBRARY OF JSCE NO.31, pp.323–316, 1998
- 9) 山谷敦,中村光,檜貝勇:回転ひび割れモデルによるRC梁のせん断挙動解析,土木学会論文集,No.620, pp.187-199, 1999