

論文

上面増厚した RC 床版の解析モデルにおける 鋼繊維混入率とひび割れモデルの影響

長谷川雅己*, 大西弘志**, 石田学***, 赤江信哉****

* 岩手大学, 大学院総合科学研究科修士課程地域創生専攻 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

** 博 (工), 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)

*** 太平洋マテリアル (株) 営業本部 (〒114-0014 東京都北区田端 6-1-1)

**** 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 (〒285-0802 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

RC 床版では輪荷重の走行による疲労と水が床版内に侵入することの複合作用が原因となって, 床版上面のコンクリートに深刻な劣化が進行する場合がある. このような劣化現象の補修補強対策の一つとして, 床版上面増厚工法がある. 既往の研究⁴⁾では, 従来の鋼繊維補強コンクリートや高強度緻密モルタルを RC 床版の上面に設置し, 静的曲げ載荷試験を行うことにより補修効果の確認を行った. 本研究では, 前述の試験体を模した有限要素モデルを作成し, 3次元非線形有限要素解析により, 鋼繊維の混入率とひび割れモデルに着目した検討を行い, 道路橋床版を模したモデルについても, 解析により挙動を確認した.

キーワード: 高強度緻密モルタル, 3次元非線形有限要素解析, 鋼繊維, ひび割れモデル

1. はじめに

RC 床版は輪荷重の走行に伴う, 荷重の繰り返し作用による疲労の影響を強く受ける. さらに, 雨水に起因する水分, 飛来塩分や凍結防止剤の形で供給される塩分がコンクリート内部に浸入することに伴い, 経年劣化が進行することが明らかになっている. 特に鉄筋の腐食による床版内部のコンクリートのひび割れや RC 床版上面のコンクリートの土砂化といった経年劣化がよく見られる. これらの床版上面に発生する劣化に対する補修補強対策の 1 つに上面増厚工法があるが, 増厚量が大きくなると死荷重の増大を招き, 段差修正等の対策工事が必要となることなどが課題となっている. それらの課題に対して, 高強度緻密モルタルを適用すると, 20mm 程度の薄層増厚で補強が可能となるため死荷重増加と段差修正を軽減できること, 更には緻密な硬化体により劣化因子となる水や塩化物の侵入を大幅に低減することが報告されている^{2) 3)}. そこで, 本研究では上面増厚層に高強度緻密モルタル, 鋼繊維補強コンクリート (SFRC) を適用した静的曲げ載荷試験結果⁴⁾を参考に, その静的載荷試験の結果を用いて非線形有限要素解析による再現を行い, 実験結果と比較した. さらに, ひび割れモデルや鋼繊維の混入率を変えた解析モデルを用意し, これらのパラメ

ータによる影響について検討し, RC 床版に施工した際の挙動に与える影響についても検討した.

2. 曲げ載荷試験概要⁴⁾

2.1 実験供試体

曲げ載荷実験に使用する供試体を図-1 に示す. 厚さ 220mm の RC 床版供試体を Case1, 厚さ 200mm の RC 床版供試体の表面に厚さ 20mm の高強度緻密モルタルによる上面増厚層を施工した供試体を Case2, 厚さ 200mm の RC 床版供試体の表面に厚さ 50mm の鋼繊維補強コンクリート(以下, SFRC と呼ぶ)を施工した供試体を Case3 と呼ぶ. 鉄筋は D16 を圧縮, 引張側に用いて, 鉄筋間隔は 125mm とした. Case2 の床版厚さは現場で舗装切削の際にコンクリート床版表面も削られて薄くなっているケースが散見されるため, 20mm 薄くなっている物を補修して設計厚さに戻すことを想定している.

実験供試体の種類は, 表-1 に示す 3 種類でそれぞれ 1 体ずつ供試体を用意した. 同表中()内数値は, 基盤となる普通コンクリート, および上面増厚材の圧縮強度試験値(材齢 28 日)である.

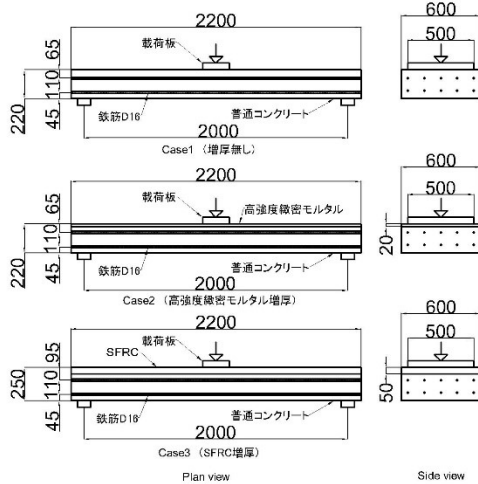


図-1 実験供試体 (単位: mm)

表-1 供試体

供試体	上面増厚
Case1	普通コンクリート(24N/mm ²)
Case2	高強度緻密モルタル(137N/mm ²)
Case3	鋼繊維補強モルタル SFRC(50N/mm ²)



写真-1 曲げ載荷試験の様子⁴⁾

2.2 載荷方法

載荷方法は写真-1に示すとおり、2mのRC梁支間中央に500mm×200mmの載荷版を用いて、荷重制御による正曲げの単調増加載荷を実施した。

2.3 実験結果

曲げ載荷実験によるひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重、終局荷重の結果を表-2に示す。ひび割れ発生荷重は50mm間隔で並べた9個のπ型変位計のいずれかの値が急激に増加した時の荷重を記載した。鉄筋降伏荷重はひび割れ発生時の剛性変化とは別の2度目の剛性変化が生じた時を鉄筋降伏荷重と定義してその荷重を記載した。最後に載荷実験における最大荷重を終局荷重としている。表-2を見ると、高強度緻密モルタルやSFRCを用いることで、ひび割れ発生荷重はそれぞれ15%、54%増加

表-2 実験結果

供試体	ひび割れ発生荷重 (kN)	鉄筋降伏荷重 (kN)	終局荷重 (kN)
Case1	26	116	160
Case2	30	136	165
Case3	40	153	233

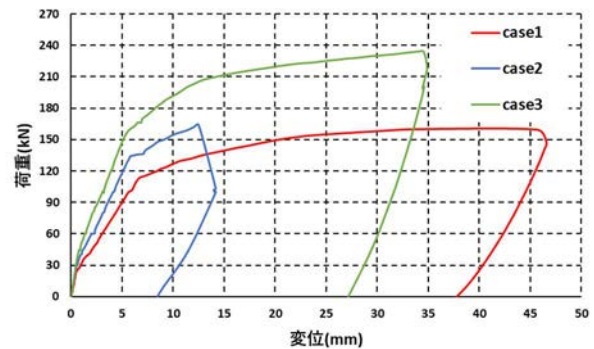


図-2 荷重変位曲線

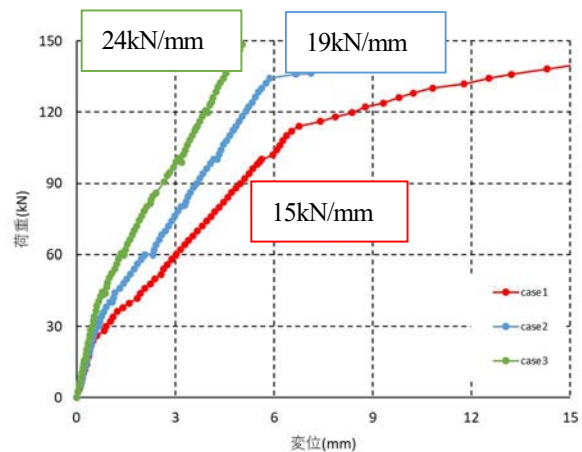


図-3 150kNまでの荷重変位曲線

し、鉄筋降伏荷重はそれぞれ17%、32%増加する結果となった。

次に載荷点直下の荷重と鉛直変位の関係を図-2に示す。ただし、Case2の最大荷重はCase1の最大荷重と大きな差が見られない。これはCase1とCase2の破壊性状の違いにより靱性が異なったためである。Case1は上面コンクリートの圧壊で終局を迎え、終局時の鉛直変位が40mm以上となる。一方、Case2は普通コンクリートとモルタルの接着層が水平せん断により剥がれることで終局を迎え、終局時の変位は12~13mm程度に留まっている。Case3は増厚層が剥がれることなく、コンクリートの上面が圧壊した。また、図-3に示した150kNまでの鉛直変位の関係から、ひび割れ発生後のグラフの傾きを比較すると、Case1、Case2、Case3の順に大きくなっていることがわかる。

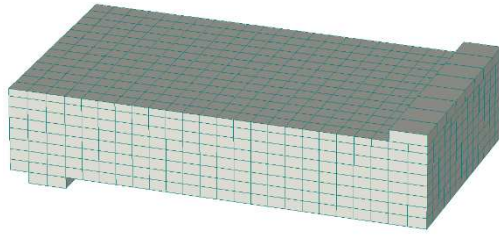


図-4 解析モデル外観

表-3 材料特性値

項目	単位	CASE1	CASE2	CASE3
ポアソン比		0.2	0.2	0.2
ヤング係数	N/mm ²	2.5×10 ⁴	3.8×10 ⁴	3.3×10 ⁴
圧縮強度	N/mm ²	20.4	80.7	42.5
引張強度	N/mm ²	1.91	6.11	3.121
破壊エネルギー	kN/mm	8.1×10 ³	1.5×10 ⁴	1.1×10 ⁴

3. 有限要素モデルを用いた数値解析

3.1 解析概要

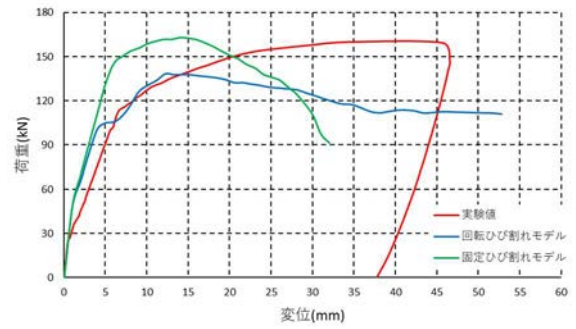
前述の実験を再現するために 3 次元非線形有限要素解析プログラム ATENA3D ver5.9.0g を用いて数値解析を行った。図-4 に今回作成したモデルを、表-3 に解析で使用する材料物性値をそれぞれ示す。材料特性値についてはコンクリート標準示方書⁶⁾を基に数値を設定した。しかし、Case2 の圧縮強度については最終的に現場養生で測定した表-3 のデータを用いた。解析では対称性を考慮し、1/2 モデルとした。また、鉄筋 D16 の材料構成則はバイリニア型とし、弾性-全塑性を仮定した。鉄筋の弾性係数は 200kN/mm²、降伏点は 362N/mm²、ポアソン比は 0.3 である。荷重条件としては変位制御法を採用し、1 ステップ当たり 1.0mm の強制変位を与えた。

分散ひび割れモデルには回転ひび割れモデルと固定ひび割れモデルの両方を使用し、比較した。2 つのひび割れモデルは以下のように定義される。

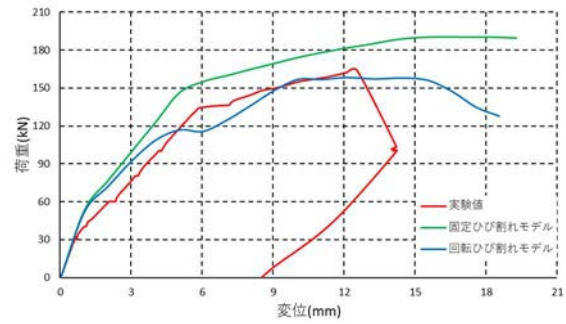
- ・固定ひび割れモデルでは、ひび割れ開始時の主応力方向でひび割れの方向が決まり、荷重が作用してもその方向は固定される。
- ・回転ひび割れモデルでは、主応力方向と主ひずみ方向が一致し、荷重が作用している間、主ひずみ軸が回転すれば、ひび割れ方向も同様に回転する。

3.2 解析結果

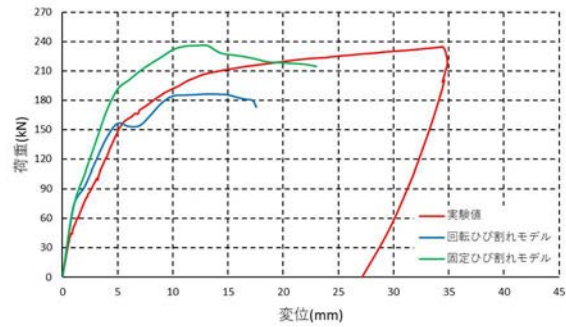
解析より得られた荷重-変位関係を図-5 に示す。Case1, Case3 の解析値を見ると、回転ひび割れモデルでは変位 10mm 程度までは解析値と実験値が概ね一致しているが、その後は荷重が小さくなっている。一方、固定ひび割れモデルでは最大荷重は概ね一致しているものの、変位が実験値よりも伸びていない。Case2 につい



(a) Case1



(b) Case2



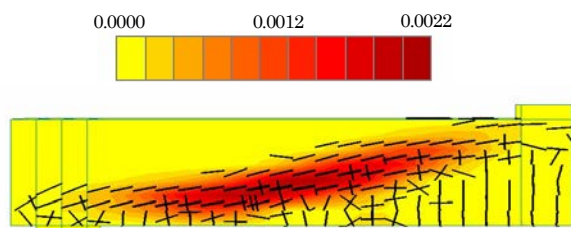
(c) Case3

図-5 ひび割れモデル別荷重変位曲線

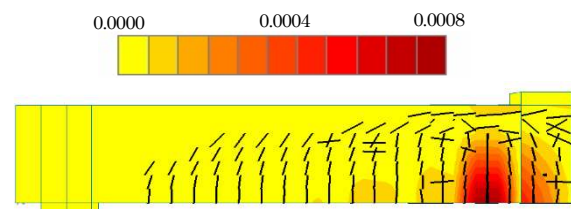
表-4 解析結果

	ひび割れモデル	Case1	Case2	Case3
ひび割れ発生荷重 (kN)	実験値	26	30	40
	回転	28.2	30.6	40.4
	固定	28.9	32.0	44.7
鉄筋降伏荷重(kN)	実験値	116	136	153
	回転	138.4	155.7	177.1
	固定	145.5	160	192
終局荷重 (kN)	実験値	160	165	233
	回転	138.4	160.6	186.1
	固定	163.1	190.4	236.1

ては、実験での補強層の剥がれは再現できなかったものの、回転ひび割れモデルでは概ね一致する結果を得られた。固定ひび割れモデルでは荷重、変位ともに大きくなっている。



(a) 回転ひび割れモデル



(b) 固定ひび割れモデル

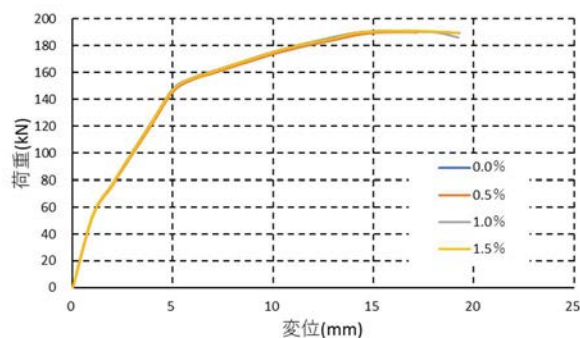
図-6 Case1 圧壊時のひび割れ図 (単位 : m)



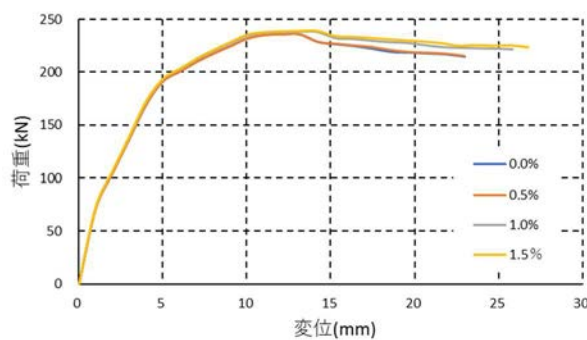
写真-2 Case1 のひび割れ状況

表-4 にひび割れ発生荷重, 鉄筋降伏荷重, 終局荷重を示す. ひび割れ発生荷重は解析モデルにひび割れが入った時の荷重をひび割れ発生荷重とした. 鉄筋降伏荷重は, モデル内中央の引張鉄筋が降伏応力に達した時の荷重を鉄筋降伏荷重とした. 終局荷重は圧縮縁ひずみが終局ひずみに達した時の荷重とした. ひび割れ発生荷重の解析値は回転ひび割れモデル, 固定ひび割れモデルともに若干の差異はあるものの実験値と概ね一致した. しかし, 鉄筋降伏荷重については, 実験値より解析値が大きくなる傾向がみられた. これは, 実験時の鉄筋降伏荷重の仮定が誤っている可能性があるため, 今後改めて検討する必要がある. 終局荷重については, 回転ひび割れモデルでは, 実験値より解析値が小さくなる傾向が見られた. Case2 に関してはかなり近い値になっているが, 補強層がはがれたことを考慮すると正しく再現できたとは言えない. 固定ひび割れモデルでは Case2 以外では概ね一致していることがわかる.

次に Case1 の圧壊時のひび割れ図を図-6 に示す. また, 実験後の Case1 のひび割れ状況を写真-2 に示す. 回転ひび割れモデルでは斜めひび割れが大きく出ている. 固定ひび割れモデルでは曲げひび割れが大きく出ている. 実験時のひび割れは曲げひび割れが大きく出ているため, 固定ひび割れモデルを用いることが適切だと考えられる. 次に鋼繊維を混入させた解析結果を図-7 に示す. 解析結果を見ると, Case2 においては鋼繊維の混入率を変化させた場合, 荷重, 変位ともにほとんど変化

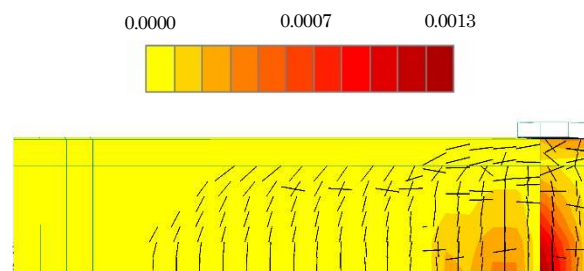


(a) Case2

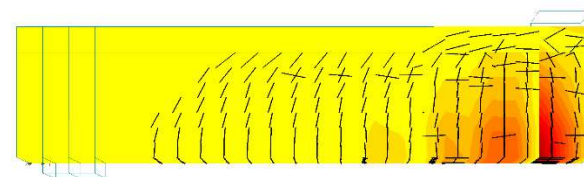


(b) Case3

図-7 鋼繊維混入率別荷重変位曲線



(a) 鋼繊維 0.0%



(b) 鋼繊維 1.0%

図-8 Case3 圧壊時のひび割れ図 (単位 : m)

がなかった. また, ひび割れ図についても変化はみられなかった. Case3 においては, 鋼繊維をモデル化していない時と比べて混入率 0.5%の時は変化がなかったが, 鋼繊維を 1.0%, 1.5%混入させた時は, 最大変位が少し大きくなった.

次に Case3 圧壊時の鋼繊維 0.0%, 1.0%の図-8 を示す. ひび割れ図を見ると, ひび割れがわずかに分散していることがわかる. これらの結果から, Case2 において変化が見られなかった理由として, 補強層が薄く鋼繊維の量が少ないことが影響していると考えられる.

4. 道路橋床版における影響の検討

4.1 解析概要

道路橋床版における影響を検討するために、道路橋示方書⁵⁾を参考に道路橋床版をモデル化した解析モデルを作成した。床版の寸法を図-9に示す。支持条件は4辺単純支持で、載荷板は床版中央に配置し、面積は短辺方向500mm×長辺方向200mmとした。床版の厚さはCase1、Case2は240mmで、Case3のみ270mmとした。鉄筋も同様にD16を使用している。ひび割れモデルは荷重値において精度が良かった固定ひび割れモデルを用いた。鋼繊維に関しては1.5%の混入率で解析を行った。また、鋼繊維混入量と剛性について確認するため、混入率についても前述と同様の方法で再度検討した。

解析の妥当性を確かめるために、case1に関して、松井式⁷⁾による押し抜きせん断耐力の計算式を用いて、解析値と計算値を比較した。

$$P_0 = \tau_{smax} \{ 2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m \} + \sigma_{tmax} \{ 2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4c_d)C_m \}$$

$$\tau_{smax} = 0.252\sigma_{ck} - 0.000246\sigma_{ck}^2$$

$$\sigma_{tmax} = 0.583\sigma_{ck}^{\frac{2}{3}}$$

ここで、a、b：載荷板の主鉄筋方向、配力鉄筋方向の辺長(mm)、 x_m 、 x_d ：主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ(mm)、 C_m 、 C_d ：引張側主鉄筋、引張側配力筋のかぶり(mm)、 τ_{smax} ：コンクリートのせん断強度(N/mm²)、 σ_{tmax} ：コンクリートの引張強度(N/mm²)、 σ_{ck} ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

4.2 解析結果

荷重変位曲線を図-10に示す。まず、解析モデルの妥当性については松井式で算出した理論式と解析値を比較すると、理論式が932kN、解析値が1051kNとなり、その誤差は約10%であった。また、荷重変位曲線では、勾配が緩やかになることなく最大耐荷力に達しているため、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ると考えられる。

次にCase2、Case3の荷重変位曲線を見ると、Case1と比べて最大荷重が11.4%、43.1%大きくなっている。しかし、Case2、Case3はどちらも変位が12mmの辺りで大きく荷重値が下がっている。これは補強層によって剛性が上がったことによって、靱性が低下していることが考えられる。

次に1000kN載荷時のひび割れを図-11に示す。Case2、Case3は無補強の時と比べてひび割れが減っていることが分かる。特に、Case2が最もひび割れが入っていないことが分かる。これは、高強度緻密モルタルの引張強度

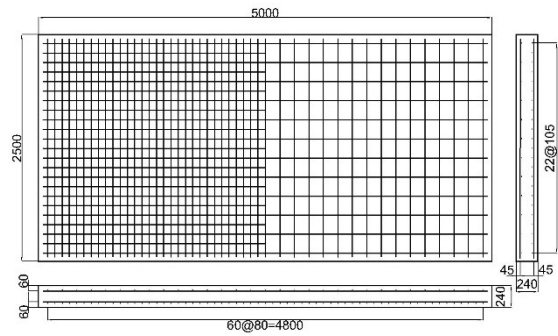


図-9 RC床版概要図 (単位: mm)

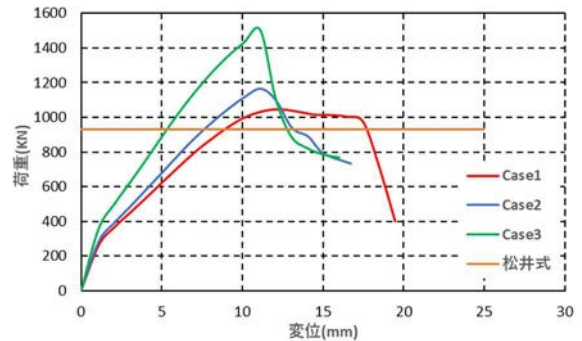
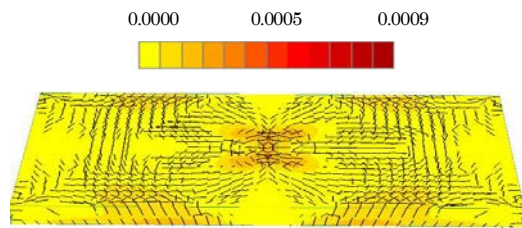
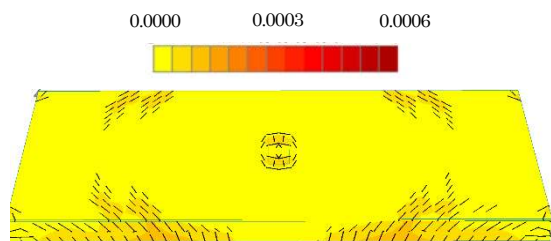


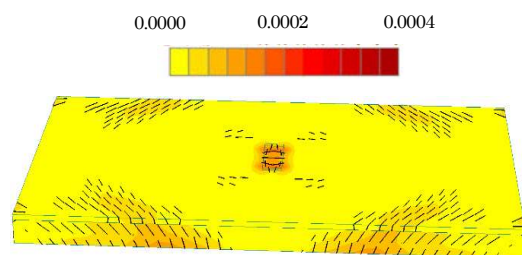
図-10 荷重変位曲線



(a) Case1

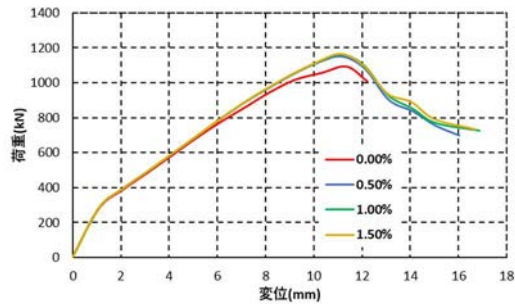


(b) Case2

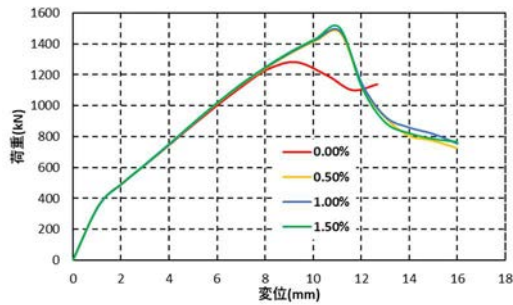


(c) Case3

図-11 1000kN 載荷時の各上面ひび割れ図 (単位: m)



(a) Case2



(b) Case3

図一12 鋼繊維混入率別荷重変位曲線

の高さが影響していると考えられる。

次に鋼繊維混入率別の荷重変位曲線を図一12 に示す。Case2, Case3 の両方とも鋼繊維を入れたときは荷重値が上がっており、混入率ではあまり差異が出なかった。また、鋼繊維を入れない場合は荷重値が下がった後、比較的早く圧壊してしまったが、鋼繊維を入れることで圧壊するまでに変位が伸びるようになった。Case3 は Case2 と比べて最大荷重と最大変位がより大きくなっているが、混入率で結果にほとんど差異が出ていないことから、混入量ではなく鋼繊維が入っている層の厚さがより剛性に関係していることが考えられる。

5. まとめ

本研究では、高強度緻密モルタル、SFRC により上面増厚補強された RC 床版の静的曲げ載荷試験をひび割れモデルや鋼繊維の混入率に着目して、FEM 解析を行った。また、実際に道路橋床版として利用するために RC 床版の解析モデルを作成し、同様の解析を行った。本論文で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ひび割れモデルについて、回転ひび割れモデルでは、ひび割れ発生荷重と鉄筋降伏荷重までは実験値と解析値が概ね一致した。しかし、最大荷重の再現までは至らなかった。一方、固定ひび割れモデルでは、最大荷重の再現をすることができた。また、固定ひび割れモデルでは、解析モデルに曲

げひび割れが強調され、これは実験時のひび割れ図と一致した。

- (2) Case2 においては鋼繊維をモデル化することによって、荷重変位曲線やひび割れに大きな変化はなかった。一方、Case3 においては鋼繊維の混入率が 1.0, 1.5% の時に、ひび割れ幅の抑制や最大変位が大きくなる等の違いがみられた。
- (3) 道路橋床版として利用した場合、床版表面のひび割れは Case2 が最も少なくなったため、床版上面からの劣化に対し、SFRC より効果的である可能性がある。また、無補強と同じ厚さでも 11.4% 最大荷重が向上したため、薄層でも床版の耐久性向上に効果があると思われる。鋼繊維混入率を変えた場合は鋼繊維の有無では荷重と変位が大きく変わったが、混入率ではあまり変化しなかった。

謝辞

本研究では、ものづくり大学の垣賀津雄教授の研究室が実験された静的曲げ載荷試験の貴重なデータを活用させていただきました。記してここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：第3章 道路橋床版の劣化進行過程の評価，道路橋床版の維持管理マニュアル 2020，2020.10
- 2) 垣賀津雄，星名誉紀，柴崎晃，原田拓也，長谷俊彦，赤江信哉，石田学：RC 床版表面における薄層の高強度高靱性緻密モルタルの試験施工，2021 年土木学会投稿論文，2021.9
- 3) 植田健介，三田村浩，真鍋英規，馬場弘毅：松島橋床版補修工事における超緻密高強度繊維補強コンクリートの適用事例報告，土木学会 第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，2018.11
- 4) 石田学，赤江信哉，垣賀津雄，柴崎晃，服部雅史，長谷俊彦：上面増厚および下面 CFRP 接着により補強した RC 床版の曲げ強度に関する実験研究，第 8 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，2020.11
- 5) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017.11
- 6) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2018.3
- 7) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，pp44-45，森北出版，2007.10

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)