

超高強度合成繊維補強コンクリートを用いたRC梁の 疲労耐荷性に関する研究

原, 紘一郎
清水建設株式会社技術研究所社会システム技術センター

園田, 佳巨
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 : 教授

野澤, 忠明
株式会社エスイー ESCON 技術開発部

玉井, 宏樹
九州大学工学研究院社会基盤部門 : 助教

<https://hdl.handle.net/2324/4793207>

出版情報 : Journal of structural engineering. A. 67, pp.619-627, 2021-03. Japan Society of Civil Engineers

バージョン :

権利関係 :



超高強度合成繊維補強コンクリートを用いた RC 梁の 疲労耐荷性に関する研究

Study on fatigue load capacity of RC beams consisting of PVA fiber reinforced concrete

原紘一郎[†], 園田佳巨*, 野澤忠明**, 玉井宏樹***
Koichiro Hara, Yoshimi Sonoda, Tadaaki Nozawa, Hiroki Tamai

[†]修 (工), 清水建設株式会社 技術研究所 社会システム技術センター
(〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

(研究当時: 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻修士課程)

*博 (工), 九州大学教授, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

**株式会社エスイー, ESCON 技術開発部 (〒136-1343 東京都新宿区西新宿 6-5-1)

***博 (工), 九州大学助教, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

In recent years, with the rapid deterioration of existing civil engineering structures, research and development of concrete materials having high durability and long life has emerged as a crucial concern. For the above reasons, technologies capable of producing ultra-high-strength concrete have been developed. Consequently, secondary products using such ultra-high-strength polyvinyl alcohol fiber-reinforced concrete (hereinafter, referred to as PVA-UFC) are now in practical use. In this study, RC beams consisting of PVA-UFC and ultra-high-strength reinforcing bars with or without joints as parameters were prepared and fatigue loading tests were conducted to calculate the fatigue load capacity. These tests were simulated using the finite element method based on continuum damage mechanics.

Key Words: ultra high strength fiber reinforced concrete, fatigue, finite element analysis, continuum damage mechanics

キーワード: 超高強度合成繊維補強コンクリート, 疲労, 有限要素法, 連続体損傷力学

1. はじめに

昨今, 高度経済成長期にかけて集中的に整備された我が国の社会基盤施設の多くが老朽化し, 深刻な社会問題となっている. 今後益々, 社会インフラの維持管理・更新に係る費用の増大が懸念されることから, 高耐久性・高寿命のコンクリート材料の開発が望まれている. このような背景の下, 2004 年には「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案) ¹⁾ (以下, UFC 指針)」が発刊され, 以降, 超高強度繊維補強コンクリート (以下, UFC) を用いた構造物や二次製品が多く見られるようになった ^{2),3),4)}. 一方で, UFC 指針によると, 従来の UFC は通常コンクリートと比較した場合の養生工程が非常に長く, 製造コストが高いことに加え, 主に鋼繊維を配合

していることから, ひび割れが生じた場合, ひび割れ面に架橋している鋼繊維の腐食により, 荷重伝達機能の低下や, 景観上の問題が生じることが指摘されている.

そこで, 共著者の野澤らの研究グループは, PVA 繊維を配合した超高強度合成繊維補強コンクリート (以下, PVA-UFC) を開発し ⁵⁾, 道路橋への利用に向けた種々の研究を行ってきた ^{6),7),8)}. PVA-UFC は, 極めて高い圧縮強度, 引張強度, せん断強度を発現することが確認されており ⁹⁾, PVA 繊維を配合していることから, 鋼繊維を配合している従来の UFC のように, ひび割れ面を架橋する補強材の腐食を心配する必要もない.

PVA-UFC を道路橋に適用するには, 走行車両の荷重による疲労損傷の可能性についても調査し, 部材の疲労耐荷性を明らかにすることが必要になるが, 過去の研究では, 鋼繊維配合の UFC を用いた部材の疲労耐久性に関する報告が複数ある一方で ^{9),10),11)}, PVA-UFC に関しては,

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: koichiro.hara@shimco.jp

表-1 PVA-UFC 材料特性

項目	単位	特性値
密度	g/cm ³	2.45
圧縮強度	N/mm ²	150
曲げ強度	N/mm ²	20
引張強度	N/mm ²	7.0
ひび割れ発生強度	N/mm ²	6.8
ヤング率	N/mm ²	46,000
ポアソン比	—	0.2

表-2 PVA-UFC 標準配合

(W+A)/B (%)	単位量 (kg/m ³)				
	水 W	結合材 B	骨材 S	混和剤 A	PVA 繊維 F
15.0	187	1,500	750	38.3	1.7vol%

表-3 PVA-UFC 圧縮強度試験結果

項目	単位	実測値
母材 (PVA-UFC)	N/mm ²	177
接合部 (PVA-UFC)	N/mm ²	178

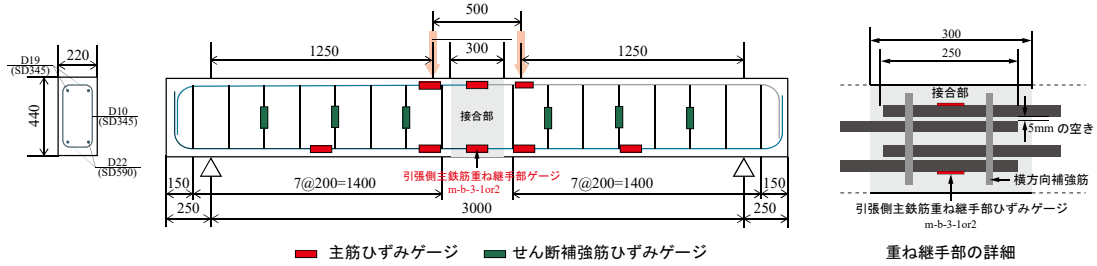


図-1 供試体概略図および重ね継手部詳細図

表-4 USD590B 機械的性質

種類の記号	降伏点又は0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	伸び (%)
USD590B	590~650	738~900	2.0×10 ⁵	12以上

表-5 試験条件詳細

項目	条件	
載荷方法	2点載荷	
支持条件	単純支持	
載荷速度	1 (Hz)	
制御方法	荷重制御	
載荷荷重	最大値	135 (kN)
	最小値	75 (kN)

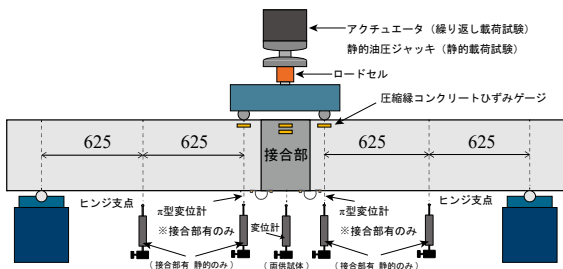


図-2 供試体設置図

RC 床版を対象とした輪荷重走行試験が数回行われただけであり、RC 梁部材を対象とした疲労耐荷性の検討は行われておらず、知見不足は否めない。また、PVA-UFC を用いた RC 梁の、品質や施工性に優れたプレキャスト部材としての利用を見据えると、構造的な弱点となりうる部材接合部が疲労耐荷性に与える影響を検討する必要があると考えられる。

そこで、本研究では PVA-UFC を用いた RC 梁の疲労耐荷性を明らかにすることを目的とし、基礎的な検討として、施工性に優れた重ね継手による接合部の有無をパラメータとする、2 種類の供試体を用いて疲労耐荷性確認試験を実施し、接合部が疲労耐荷性に及ぼす影響を検討した。さらに、既往の研究においては、普通コンクリートを用いた床版の疲労損傷に関するシミュレーションは行われている一方で¹²⁾、超高強度コンクリートを使用しかつ、重ね継手による接合部を有する RC 梁の、高サ

イクル疲労損傷下における解析的検討を行った事例は見られないことから、疲労損傷が RC 梁の耐力に与える影響を定量的に評価可能な解析手法を提示するため、重ね継手部及び部材接合部に着目した疲労損傷モデルを汎用有限要素解析ソフトに導入し、本研究中で行った疲労試験の再現解析を試みた。

2. PVA-UFC の特徴

表-1 に PVA-UFC の材料特性、表-2 に PVA-UFC の標準配合を示す。また、本試験では PVA-UFC の圧縮強度試験のみ実施したため、その結果を表-3 に示す。本研究で使用した PVA-UFC は、低熱ポルトランドセメントをベースとし、シリカヒュームが添加された結合材を使用している。骨材には、最大粒径 2mm 以下の珪砂を使用し、粗骨材は使用していない。また、ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用することで、水結合比を 15% とした。さらに、補強繊維として親水性の高いポリビニルアルコール系の PVA 繊維 (引張強度 1.2×10³ MPa、繊維長 12mm) を 1.7vol% 添加している。これらの材料を十分

練り混ぜた後に、打設後 24 時間以上は期中養生し、その後、90℃で 8 時間の蒸気養生を行った、(目地部は試験日まで気中養生としている。) 以上の材料・製造方法とすることで、本試験で使用した PVA-UFC は UFC 指針¹⁾の適用範囲にあたる圧縮強度 150 N/mm² という超高強度を発揮する。

3. 疲労耐荷性確認試験

3.1. 試験概要

(1) 供試体について

供試体概略図および重ね継手部詳細図を図-1 に示す。本研究では、PVA-UFC を用いて製作された接合部が無い(一体打ちの)供試体と、スパン中央部に重ね継手による接合部を有する供試体の 2 体を用いて試験を行った。供試体は、幅 200mm、高さ 440mm の矩形断面、スパンを 3,000mm としており、PVA-UFC の高い圧縮強度に釣り合いを持たせるため、引張側主鉄筋には D22 のネジ節を有する超高強度鉄筋 USD590B (降伏強度 590 N/mm²) を用いている。表-4 に USD590B の機械的性質を示す。なお、圧縮側主鉄筋、重ね継手部の横方向補強鉄筋、せん断補強筋にはそれぞれ D19、D13、D10 の SD345 鉄筋 (降伏強度 345 N/mm²) を用いた。重ね継手長の設定にあたっては、道路橋示方書¹³⁾記載の重ね継手長算出式を用いている。式(1)にその計算式を示す。

$$l_a = \frac{\sigma_{sa}}{4\tau_{0a}} \cdot \phi \quad (1)$$

ここで、 l_a は付着応力度より算出する重ね継手長 (mm)、 σ_{sa} は鉄筋の引張応力度の基本値 (N/mm²)、 τ_{0a} はコンクリートの付着応力度の基本値 (N/mm²)、 ϕ は鉄筋の直径である。共著者の野澤らは、過去に実施した「鉄筋とコンクリートとの付着強度試験¹⁴⁾」(JSCE-G 503-2013) から、PVA-UFC の許容付着応力度として 10.7(N/mm²) を求めており、本試験では短期荷重下として 1.5 倍にした値を付着応力度 τ_{0a} として式(1)に入力した。また、鉄筋の引張応力度 σ_{sa} は、引張側主鉄筋の降伏値である

590(N/mm²) を式(1)に与え、これらの値から重ね継手長を求めると 202mm となる。道路橋示方書¹³⁾には、 l_a は式(1)を満たしかつ、鉄筋の直径の 20 倍以上重ね合わせた長さとするとの記載があるため、今回の条件では 440mm 以上継手を設ける必要があるが、本試験では PVA-UFC の付着応力度を期待し、計算結果に安全率を設けた上で、 l_a を 250mm として重ね継手長を設定している。

(2) 試験方法及び計測項目について

本試験は、4 点曲げによる 200 万回の繰り返し載荷試験と、静的 4 点曲げ試験の 2 段階に分かれており、繰り返し載荷試験では、供試体設計時の断面算定より、主鉄筋に作用する応力度が永続作用時の制限値である 165 N/mm² から、変動荷重用時の制限値である 300 N/mm² になる荷重範囲で、最小で 75kN、最大で 135kN になるような正弦波形状荷重を載荷速度一定 (1Hz) で与えた。載荷は治具を用いて 2 点載荷で行い、支持条件は単純支持とした。図-2 に供試体設置状況、表-5 に試験条件を示す。計測項目は、図-1 中に示す位置における鉄筋ひずみ、圧縮側コンクリートひずみ、供試体底面変位、支点反力、接合部界面における目開き量 (接合部有の供試体のみ) としている。

3.2. 繰り返し載荷試験結果

(1) たわみ量の推移に関する考察

図-3 に、供試体スパン中央たわみと載荷回数関係を示す。載荷 200 万回目での平均荷重時におけるたわみは、接合部無の供試体で、3.46mm である一方、接合部有の供試体で 4.65mm と大きな値を示したが、スパンが 3000mm であることを考慮すると、接合部の有無による大きなたわみの差は認められず、また、両供試体共に載荷 50 万回以降、変位の伸びがほとんどみられないという共通の応答を示した。さらに、200 万回の繰り返し載荷中に、供試体は破壊に至らず、たわみの急激な増加も確認されなかったため、本試験における荷重範囲では、両供試体の高い疲労耐荷性が確認された。

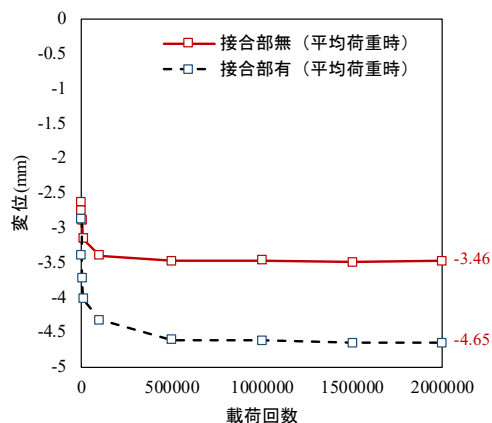


図-3 スパン中央たわみ-載荷回数関係

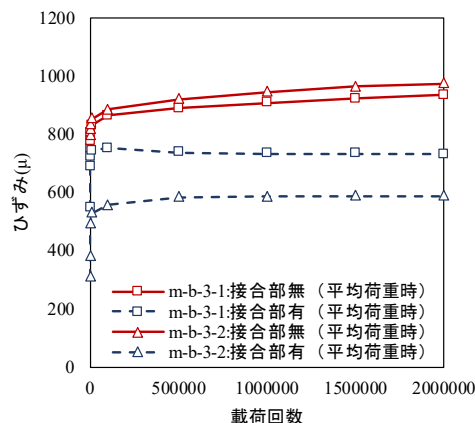


図-4 引張側主鉄筋ひずみ-載荷回数関係

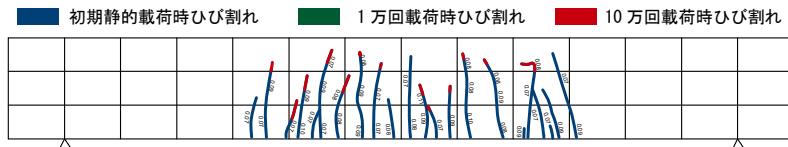


図-5 接合部無し供試体ひび割れ分布

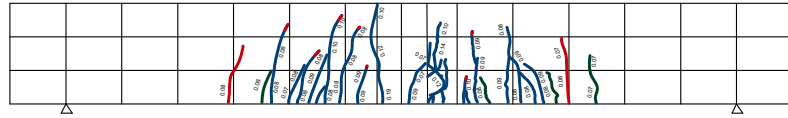


図-6 接合部有り供試体ひび割れ分布

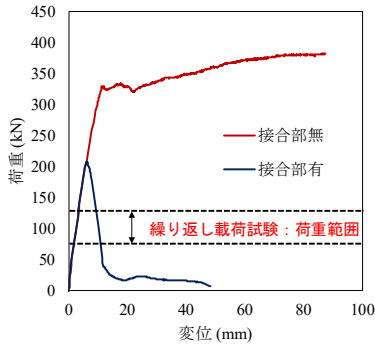


図-7 荷重-変位関係

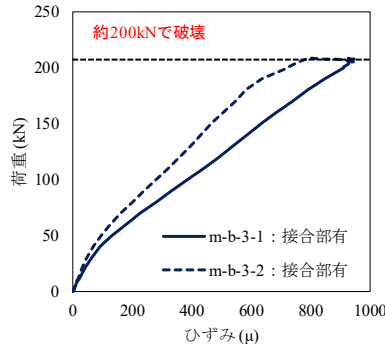


図-8 荷重-引張側主鉄筋ひずみ関係

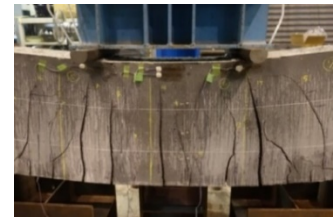


写真-1

接合部無し供試体の破壊性状
(供試体側面を撮影)

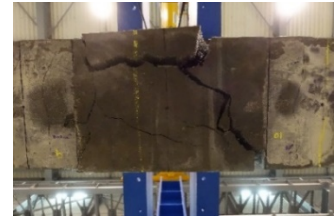


写真-2

接合部有り供試体の破壊性状
(供試体底面を撮影)

(2) 鉄筋ひずみの推移に関する考察

図-4 に引張側主鉄筋中央のひずみと載荷回数との関係を示す。接合部の有無に着目し、両供試体の結果を比較すると、接合部を有する供試体のひずみは、引張側主鉄筋の重ね継手部 (m-b-3-1) において、載荷 10 万回目以降、減少に転じていることが確認できる。これは、本供試体の重ね継手部においては、継手近傍に微細なひび割れが生じ、重ね継手部での荷重伝達機能が低下した可能性を示唆するものと考えられ、継手手法の改善が必要であることが認められた。今後、より長い重ね継手長の採用や、継手部での付着力向上が見込まれる材料配合を用いた場合の検討が必要であると考えられる。

(3) ひび割れ分布について

繰り返し載荷試験終了後に各供試体に生じた梁表面のひび割れの分布を、図-5、図-6 にそれぞれ示す。接合部の無い一体打ちの供試体では、試験開始時に正弦波荷重の平均荷重まで静的に載荷した際に初期ひび割れが生じて以降、新規のひび割れの発生は見られず、10 万回載荷までに既存のひび割れの成長のみが確認された。また、発生したひび割れの幅は最大で 0.10mm 程度以下であり、梁の耐久性に影響を及ぼすほどのひび割れの進展は見られなかった。一方で、接合部を有する供試体には、図-6 に示すように、接合部と母材の界面付近に、梁の断面を貫通するほどのひび割れの発生が確認されたことから、接合部と母材コンクリートの界面の施工に改善が必要であることが認められた。

3.3. 静的載荷試験結果

(1) 疲労試験後の残存耐力に関する考察

静的載荷試験で得られた荷重-変位関係を図-7 に示す。接合部が無い一体打ちの供試体は、繰り返し載荷試験の最大荷重を大きく上回る約 325kN でスパン中央位置の引張側主鉄筋が降伏した後も耐力を失わず、試験機の載荷能力の限界 (約 90mm の変位) 後も PVA-UFC の圧壊は生じなかったことから、この時点で試験を終了した。この結果より、PVA-UFC と超高強度鉄筋 (USD590B) を組み合わせた RC 梁が、高い疲労耐力性及び靱性を有することが明らかとなった。

一方で、スパン中央部に重ね継手による接合部を有する供試体は、引張側主鉄筋の塑性荷重に至る前に、約 200kN 付近で、重ね継手部近傍と接合部界面付近を中心に脆性的な破壊が生じた。図-8 に引張側主鉄筋の重ね継手部で計測した、荷重と鉄筋ひずみの関係を示す。図より、供試体破壊時に重ね継手部の引張側主鉄筋に生じていたひずみを求めると、m-b-3-1 で約 948 μ 、m-b-3-2 で約 885 μ となり、これらの値に USD590B の弾性係数を乗じて主鉄筋に作用していた引張応力度を求めると、それぞれ、約 190N/mm²、約 177N/mm² となる。従って、本試験においては重ね継手長の設計時に想定していた引張応力度 (590 N/mm²) 以下で破壊が生じたこととなり、疲労による付着機能の低下が示唆される結果となった。また、本試験結果から、今回のような超高強度材料を用いた場合や、高サイクル疲労を想定する場合には、安全で合理的な重ね継手長さを設計するため、式(1)には適切な補正

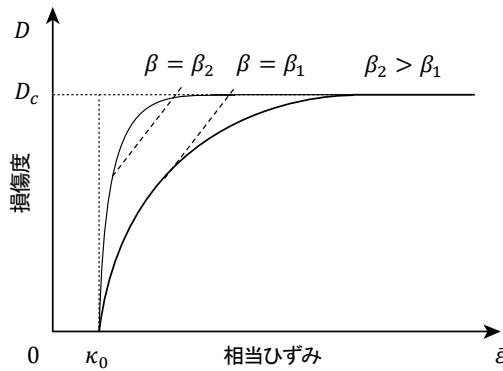


図-9 損傷進展式の概形

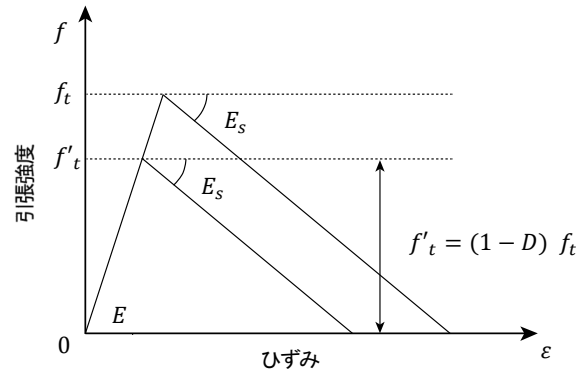


図-10 損傷度による引張強度の低減

係数や、最低継手長さ等を設ける必要があることが示唆される結果となった。

(2) 破壊性状に関して

静的載荷試験終了後の接合部の無い供試体、接合部を有する供試体の破壊性状を写真-1 (供試体側面を撮影)、写真-2 (供試体底面を撮影) にそれぞれ示す。一体打ちの供試体は、載荷にもなって繰り返し載荷試験中に生じたひび割れが大幅に成長し、供試体全体が大きく曲げ変形したが、試験終了まで圧縮側でのコンクリートの圧壊は生じず、耐荷力を失わなかった。一方、接合部を有する供試体は、接合部界面付近に、梁断面を貫通するほどの大きなひび割れが生じ、脆性的な破壊に至った。本試験では、写真-2 に示すような、側面・表面割裂による付着割裂破壊が確認された。

4. 疲労耐荷性確認試験の再現解析

前章までで述べたように、PVA-UFC と超高強度鉄筋 USD590B を組み合わせた RC 梁は、一体打ちの場合、高い疲労耐荷性を有することが試験により明らかとなり、今後の道路橋等への利用に向けた有益な知見を得ることができた。一方で、重ね継手による接合部を有する場合には、継手部での脆性的な付着割裂破壊が生じる結果となり、繰り返し載荷による耐荷力の著しい低下が確認された。そこで、本研究では繰り返し載荷による耐荷力の低下を表現可能な損傷モデルを提案し、有限要素解析を用いた再現解析を行った。

4.1. 解析手法の概要

(1) 本研究で用いた損傷モデル

材料内部に生じる損傷を評価する場合、損傷進展式として、相当塑性ひずみ速度を、そのひずみ経路に沿って積分した値、すなわち、累積塑性ひずみを変数とする式を採用する場合が多い¹⁵⁾。コンクリート部材を対象とした既往の研究としては、Peerlings らが考案した、コンクリート材料の圧縮強度と引張強度の比をパラメータとして、Von Mises の降伏曲面を修正し、相当ひずみの関数と

して損傷度 D をスカラー量として評価する手法が知られている¹⁶⁾。本研究が対象とする PVA-UFC は、材料の疲労特性や塑性変形時の損傷進展特性に関わる情報が十分ではないことから、簡便な Peerlings らが提案したスカラー損傷変数を用いた手法を適用することにした。

しかし、Peerlings らの研究では単調載荷による実験をベースとして損傷モデルの検証を行っており、本研究では高サイクルの繰り返し載荷下の疲労損傷度を評価する必要があるため、彼らの手法をそのまま採用するには無理がある。そこで、本研究では、移動硬化則を考慮した線形 Drucker-Prager の降伏関数を用いて相当塑性ひずみを算出し、Peerlings らが用いた損傷進展式を、相当塑性ひずみを変数とした形に修正することで、損傷度評価を行うこととした。式(2)に線形 Drucker-Prager の降伏関数、式(3)に増分形の相当塑性ひずみ $d\varepsilon_p$ 、式(4)に本研究で提案した損傷進展式を示す。

$$f(J_2, I_1) = \sqrt{J_2} + AI_1 - k = 0 \quad (2)$$

$$d\varepsilon_p = \frac{AI_1 + \sqrt{J_2}}{\bar{\sigma}} \sqrt{\frac{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}{\frac{1}{2} + 3A^2}} \quad (3)$$

$$D = 1 - \frac{\kappa_0}{(\kappa_0 + \varepsilon_p)} [(1 - \alpha) + \alpha e^{-\beta \varepsilon_p}] \quad (4)$$

ここで、 I_1 は応力の一次不変量、 J_2 は偏差応力の二次不変量、 A, k は材料定数であり、 $d\varepsilon_{ij}^p$ は塑性ひずみ増分テンソル、 κ_0 は損傷進展開始時点の相当ひずみ、 α, β は損傷進展に関わる材料パラメータである。式(4)は図-9 のように、相当ひずみが κ_0 に達した時点から損傷が進展し、相当塑性ひずみの増加に従って、仮定した損傷の臨界値である D_c に漸近する曲線を描く。なお、損傷進展パラメータ β は、損傷の進展割合を支配する値であり、 β が大きくなるに従って図中に示すように、損傷の進行が変化する。本研究では、式(4)を用いて計算された損傷度 D を材料の構成方程式に導入することで、損傷の進展による部材の剛性低下を表現している。具体的には、損傷の非可逆性を考慮し、(i)非損傷状態かつ載荷または除荷時は式(5)、(ii)損傷状態かつ載荷時は式(6)、(iii)損傷状態かつ除荷時は式(7)に示すように応力の更新を行った。

$$(i) \quad d\sigma_{ij} = E_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl} \quad (5)$$

$$(ii) \quad d\sigma_{ij} = [(1-D)E_{ijkl}^e - E_{ijkl}^p] d\varepsilon_{kl} \quad (6)$$

$$(iii) \quad d\sigma_{ij} = [(1-D)E_{ijkl}^e] d\varepsilon_{kl} \quad (7)$$

ここで、 $d\sigma_{ij}$ は応力増分テンソル、 $d\varepsilon_{kl}$ はひずみ増分テンソル、 E_{ijkl}^e は弾性剛性テンソル、 E_{ijkl}^p は移動硬化則を考慮した線形 Drucker-Prager の降伏関数を用いて導出した塑性剛性テンソルである。

さらに、本研究では、200 万回の繰り返し载荷により部材内部に生じた微細ひび割れが、重ね継手部及び部材接合部界面の荷重伝達機能の低減、さらにはコンクリートの引張強度の低下に繋がったと仮定し、式(8)を用いて該当要素の積分点毎に算出した損傷度 D に応じて引張強度の低減を行うことで、耐荷力低下のモデル化を試みた。式(8)中の f_t は初期の引張強度、 f'_t は損傷後の引張強度である。図-10に引張強度の低減と損傷度 D の関係を示す。

$$f'_t = (1-D)f_t \quad (8)$$

また、図-10に示すように、引張強度後は線形軟化則に従うものとし、その軟化勾配 E_s は、要素の寸法依存性を低減させるために、破壊エネルギーの等価性を仮定した Bazant¹⁷⁾が提案する式を用いて算出している。なお、繰り返し载荷による損傷後の軟化勾配 E_s には不明な点が多いため、本研究では損傷の前で軟化勾配は同一であると仮定して計算を行っている。式(9)に Bazant らの式を、式(10)に要素等価長さ l の算出式¹⁸⁾を示す。

$$E_s = \left(\frac{1}{E} - \frac{2G_f}{f_t^2 l} \right)^{-1} \quad (9)$$

$$l = 2(3V)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{1}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

ここで、 G_f は破壊エネルギー、 V は要素の体積である。破壊エネルギー G_f に関しては、一般に繊維補強コンクリートは配合繊維の架橋効果により、普通コンクリートより大きな破壊エネルギーを発現することが知られているため、既往の研究¹⁹⁾を参考に、普通コンクリートの汎用値として用いられる 0.1(N/mm)の 10 倍である、1(N/mm)を入力している。

(2) 解析モデル及び材料定数について

本解析が対象とする供試体は、重ね継手（継手長 250mm）による接合部を有することから、重ね継手部及び接合部と母材コンクリートの界面を適切に離散化し、材料特性等を定義しなければならない。そこで、本研究では「重ね継手部」と「部材接合部界面」を、主鉄筋や母材コンクリート部とは異なる材料特性を有する要素として離散化し、モデル化を行った。具体的には図-11に

示すように、「重ね継手部」に関しては、引張側主鉄筋のスパン中央部 250mm を重ね継手部とし、「部材接合部界面」に関しては、接合部と母材の界面に当たる領域を、母材コンクリート (PVA-UFC) とは異なる材料特性を与え、薄い面としてモデル化した。なお、重ね継手部の忠実なモデル化を行うと、要素分割が極めて煩雑になり、計算コストの増大が懸念されることから、本研究では図-11のように、実験において付着割裂破壊が確認された引張側主鉄筋のみ「重ね継手部」を設け、要素数の削減を試みた。本解析では、せん断補強筋、圧縮側主鉄筋及び重ね継手部の横方向補強鉄筋を、1 積分点を有するトラス要素、他は全て、8 積分点を有する 1 次要素を用いて離散化している。解析モデルの寸法は実験供試体と同様にしているが、主鉄筋の折り曲げ、引張側主鉄筋のリブや節の凹凸までは考慮していない。

材料定数に関しては、今回の試験では PVA-UFC の圧縮強度試験のみ行ったため、圧縮強度以外の他の材料定数との整合性をとるため、コンクリート部にあたる要素には表-1 記載の特性値を、鋼材に該当する要素には、それぞれの強度に応じた材料特性を入力している。なお、圧縮強度の実測値と特性値には 1 割程度の差があるものの、事前実施した解析において、この差が結果に殆ど影響を及ぼさないことを確認している。各材料毎の特筆すべき点として、「部材接合部界面」要素に関しては、コールドジョイント部であることから、母材引張強度に対して 1 割程度の強度低下を仮定し、初期引張強度をコンクリート (PVA-UFC) の 90%と設定して解析を行った。

損傷パラメータを表-6 に示す。各材料における式(4)中の損傷進展パラメータ α 、 β に関しては、PVA-UFC の疲労特性に関する十分な知見が得られていないため、既往の研究で Peeling¹⁶⁾の手法を用いた sonoda²⁰⁾が使用した値を各材料に適用し、損傷開始時の相当ひずみ κ_0 は、各材料の引張強度を弾性係数で除した値を入力している。なお、「重ね継手部」における損傷の進展は、継手部近傍のコンクリートの損傷に由来すると仮定することが合理的であると判断し、損傷度はコンクリート (PVA-UFC) 材料の相当塑性ひずみを用いて計算し、引張強度は主鉄筋と同様の値を与えている。損傷度の上限値 D_c の設定に際しては、Lemaitre らの既往の研究¹⁵⁾において、構造材料が破断に至るまでの損傷変数の上限（破断時）が、概ね 0.3 程度とされていることを踏まえ、本研究では表-6 中に示すように、均質な材料における損傷上限値の目安である 0.3 より大きい値として、各材料に 0.4~0.5 の値を与えて解析を試みた。

本解析では、実際の試験において、補強筋の何れの計測箇所においても、繰り返し载荷試験中の鉄筋の塑性化が確認されなかったため、鉄筋要素に関しては、移動硬化則を適用した Von Mises の降伏条件に基づく弾塑性体としてモデル化し、塑性後は初期剛性の 1/100 で硬化し、除荷剛性は初期剛性と等しいと仮定して解析を実施した。

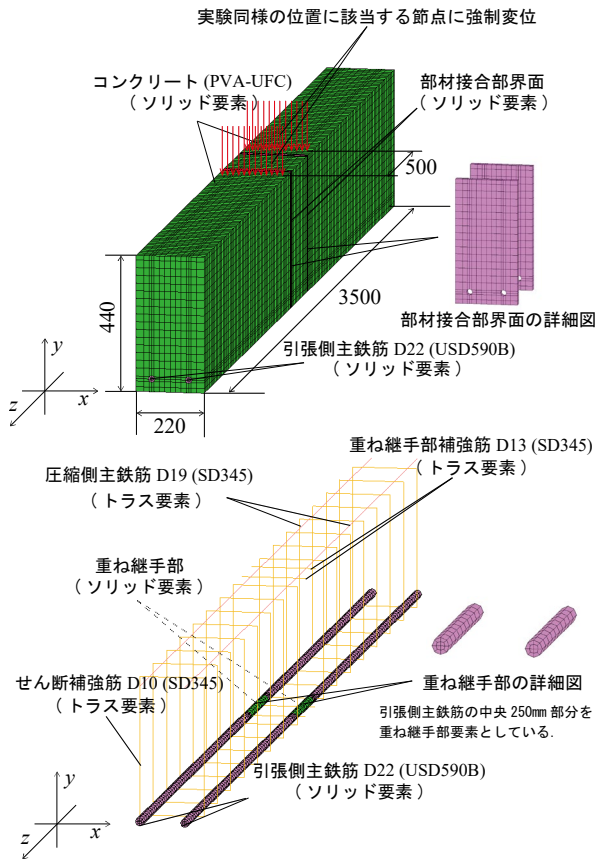


図-11 重ね継手を有する供試体
解析モデル (斜視図)

表-6 損傷パラメータ

材料	κ_0	α	β	D_c
コンクリート (PVA-UFC)	1.48×10^{-4}	0.99	21000	0.4
部材接合部界面	1.33×10^{-4}	0.99	21000	0.5
重ね継手部	1.48×10^{-4}	0.99	21000	0.4

(3) 解析フロー及び境界条件について

本解析では実験同様に解析を2段階に分け、1段階目では繰り返し載荷試験の再現を、2段階目では静的4点曲げ載荷試験の再現を行った。ソルバーには汎用有限要素解析ソフト MSC.Marc を使用している。1段階目では前述の損傷進展則を基に作成した材料構成則を、ユーザーサブルーチン²¹⁾として Marc に導入し、各積分点における損傷度の計算を行った。2段階目では、引張軟化特性を定義する他のユーザーサブルーチン²¹⁾を用いて、図-10 で示したように1段階目で計算した損傷度に応じて、積分点毎に引張強度の低減を行った。また、1段階目の繰り返し載荷解析において、200万回の繰り返し載荷を解析上で忠実に再現することは、計算コストを考えると、現実的ではないため、繰り返し載荷試験で得られた、スパン中央たわみと載荷回数との関係(図-3)より、図-12 に示す段階的な強制変位を与え、簡易に200万回の繰り返し載荷試験の再現解析を行った。図-13 に、本解析

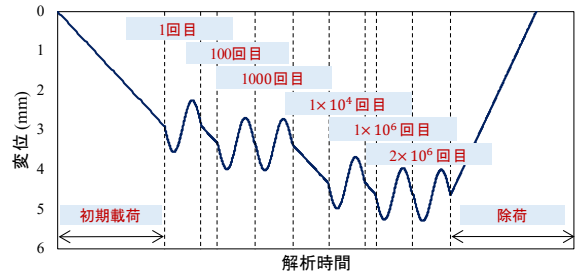


図-12 強制変位条件

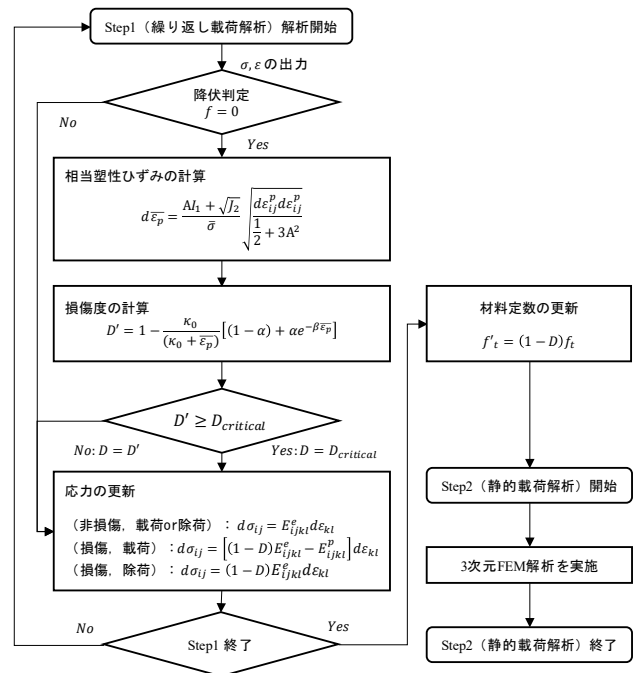


図-13 解析フロー

のフローを示す。

4.2. 接合部の無い供試体を対象とした妥当性確認解析 (1) 疲労耐力力について

本研究ではまず、提案した力学モデルの妥当性を確認するため、接合部の無い供試体を対象とした実験の再現解析を行った。使用した解析モデルは、図-11 に示した接合部を有する解析モデルの「部材接合部界面」、「重ね継手部」をそれぞれ、母材コンクリート、引張側主鉄筋とし、継手部の横方向補強鉄筋を含む鋼材の配筋を、実験供試体に合わせ変更したモデルである。従って、損傷進展則はコンクリート部 (PVA-UFC) にのみに適用して解析を実施している。図-14 に、解析2段階目(静的4点曲げ載荷解析)において得られた荷重-変位関係を示す。図-14 中には損傷進展則を入れずに健全状態を想定した解析結果も掲載しているが、疲労による損傷を考慮した解析結果は実験結果と概ね合致しており、また、健全状態を想定した FEM 解析と比較すると、耐力の低下が再現されていることから、今回提案した力学モデルの妥当性が確認されたといえる。

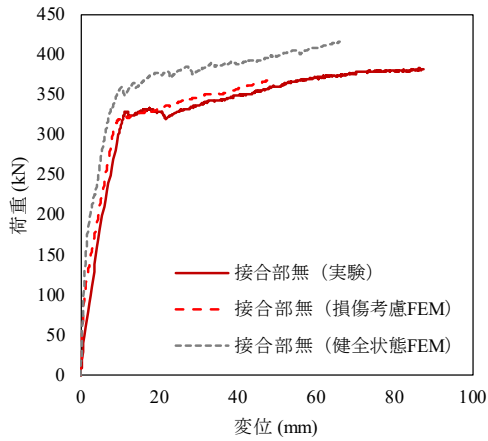


図-14 荷重-変位関係

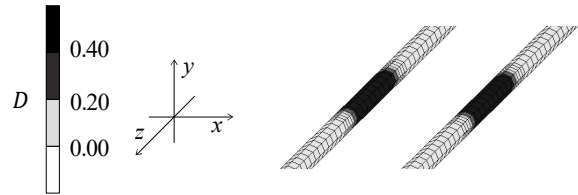


図-15 解析1段階目終了時の損傷度分布 (重ね継手部近傍)

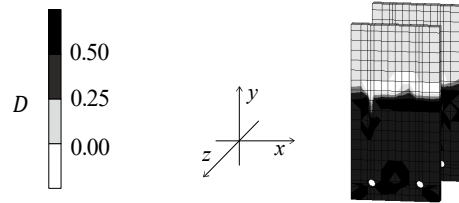


図-16 解析1段階目終了時の損傷度分布 (部材接合部界面)

4.3. 接合部を有する供試体を対象とした再現解析

(1) 損傷度分布について

前節において、提案した力学モデルの妥当性を確認したことから、本節では図-11に示した解析モデルを用いて、重ね継手による接合部を有する供試体を対象とした再現解析を行った。図-15, 16に、解析1段階目（繰り返し載荷解析）終了後に生じた損傷度の分布を示す。図中では、生じた損傷度に応じて色分けを行っており、仮定した損傷度の上限值に達した領域を黒色で示している。今回の解析では、相当塑性ひずみを変数とする、スカラー損傷変数を用いて累積する損傷度 D の評価を行っていることから、実際の試験で確認されたひび割れの本数や、ひび割れの進行方向の再現は困難であるが、図中に示すように、重ね継手部では該当する殆どの要素が、部材接合部界面においては中立軸以下のほぼ全ての領域が、仮定した上限の損傷度 D_c に達していることが確認された。従って、供試体表面のひび割れだけでは観測できなかった微細な空隙や欠陥が、200万回の繰り返し載荷終了時には供試体内部には蓄積していたことが推察され、耐力低下の主要な要因になったと考えられる。

(2) 疲労耐力について

図-17に、解析2段階目（静的4点曲げ載荷解析）において得られた荷重-変位関係を示す。実際の試験では、荷重が約200kNに達した時点で、継手近傍において側面・表面割裂による付着割裂破壊が生じ、耐力の急激な低下が確認されたが、今回提案した力学モデルを採用した場合においても、荷重が約200kN付近に達した時点から耐力の低下が確認され、その挙動を定性的に再現することができた。今後のPVA-UFCの疲労特性に関する材料試験データの蓄積により、最適なパラメータを設定することができれば、より精緻に耐力変化のシミュレーションが可能であると推察する。

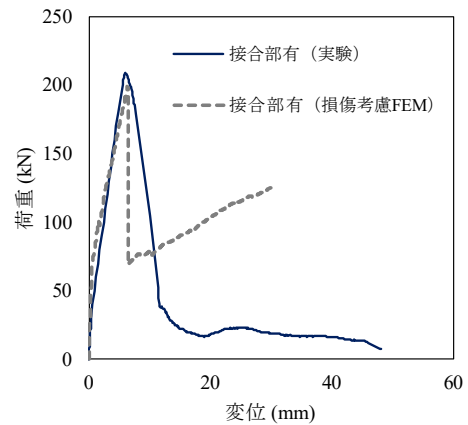


図-17 荷重-変位関係

5. 結論

本研究は、超高強度合成繊維補強コンクリート (PVA-UFC) と超高強度鉄筋 USD590B を用いて製作された2種類の供試体を用いた疲労耐力確認試験を実施し、さらに、疲労試験で確認された繰り返し載荷による耐力性能の変化を、累積するスカラー損傷度 D を用いて表現できる力学モデルを提案し、連続体損傷力学に基づく有限要素法を用いて数値シミュレーションを行ったものである。本研究の範囲内で得られた結果は以下の通りである。

- (1) PVA-UFC と超高強度鉄筋 USD590B を組み合わせて作成された2種の供試体は、本研究中の荷重範囲における200万回の繰り返し載荷試験においては、接合部の有無の違いにより、たわみと引張側主鉄筋ひずみに若干の差が生じたものの、たわみの急激な増加や補強筋の塑性は確認されなかった。
- (2) 接合部が無い供試体は、繰り返し載荷10万回以降は、梁表面に生じたひび割れの新たな成長は確認さ

れず、200万回の繰り返し載荷後に生じたひび割れ幅も0.10mm程度以下であったことから、梁の耐久性に影響を及ぼすほどのひび割れは認められず、PVA繊維の架橋効果により、ひび割れの進展が抑制されていることが確認された。

- (3) 接合部が無い供試体は、繰り返し載荷試験後の静的残存耐力試験において、引張側主鉄筋の塑性荷重後も耐力は低下せず、コンクリートの圧壊も生じなかったため、PVA-UFCと超高強度鉄筋USD590Bを組み合わせたRC梁は高い疲労耐力性と高い靱性を両立した優れた性能を有していることが判った。
- (4) 重ね継手による接合部を有する供試体は、道路橋示方書に準じて、引張側主鉄筋の降伏値を想定応力度として継手長を設けたが、200万回の繰り返し載荷後には、鉄筋の塑性荷重以前に破壊が生じたため、本試験のようにPVA-UFC、USD590Bといった超高強度材料を用いる場合や、高サイクル疲労を想定する場合には、安全で合理的な設計を行うため、既往の継手長算定式に適切な補正を施す必要があることが示唆された。
- (5) 本研究で提案した損傷力学モデルを用いることで、接合部を有する供試体で確認された重ね継手部及び、部材接合部界面における疲労損傷による著しい耐力の低下を定性的に再現できることが確認された。

本研究での結果を踏まえ、今後は継手長さや配合繊維量の違いが疲労耐力性に与える影響の検討や、変動応力度を小さくした疲労試験の実施、また、PVA-UFCの疲労特性の把握や、より精緻な損傷モデルの適用などを検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案)、コンクリートライブラリー113, 2004.
- 2) 大熊光, 大竹明朗, 黒岩正, 西川孝一：超高強度繊維補強コンクリートを用いた国内初の道路橋, 土木学会第60回年次学術講演会, VI-263, pp.525-526, 2005.
- 3) 渡邊有寿, 柳井修司, 入内島克明, 栖原健太郎：超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を場所打ちで施工したPC橋—小滝川橋—, コンクリート工学, Vol.53, No.7, p629-634, 2015.
- 4) 大竹明朗, 野口孝俊, 大熊光, 横井謙二：羽田D滑走路建設工事におけるUFC床版の製作, プレストレストコンクリート, Vol.52, 2010.
- 5) 濱口祥輝, 前田宏樹, 東山浩士, 松井繁之：PVA繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリートの材料特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.295-300, 2015.
- 6) 崔準祐, 牟田諒平, 野澤忠明, 大塚久哲：超高強度材料を使用したRC柱部材の耐力および変形性能確

- 認実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.451-456, 2015.
- 7) 野澤忠明, 濱口祥輝, 大石裕介, 松井繁之：超高強度材料を用いた薄型RC床版の開発, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.1214-1225, 2016.
 - 8) 野澤忠明, 松永徳重, 崔準祐, 大塚久哲：超高強度材料を用いたRC梁部材の構造特性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.427-432, 2017.
 - 9) 田中良弘, 高倉克彦, 阿部忠, 木田哲量, 前堀伸平：超高強度繊維補強コンクリート床版の輪荷重走行に対する疲労特性, 第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.149-154, 2006.
 - 10) 北村健, 岩崎郁夫, 趙唯堅, 岸田政彦, 石原陽介, 岩城一郎：道路橋UFCプレキャスト床版の耐力および耐疲労性に関する検証, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.806-819, 2017.
 - 11) 小坂崇, 金治英貞, 一宮利通, 藤代勝, 三木朋広：ワッフル型UFC床版の輪荷重載荷による静的特性および耐疲労性, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.74, No.3, pp.491-503, 2018.
 - 12) 藤山知加子, 商峰, 櫻井信彰, 前川宏一：直接経路積分法に基づく鋼コンクリート合成床版の疲労寿命推定と損傷モード, 土木学会論文集A, Vol.66, No.1, pp.106-116, 2010.
 - 13) 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.84-87, 2017.
 - 14) 土木学会：コンクリート標準示方書[基準編], pp.331-334, 2013.
 - 15) J. Lemaitre : *A Course on Damage Mechanics*, Springer Verlag, 1992.
 - 16) R. H. J. Peerlings, R. de Borst, W. A. M. Brekelmans and M. G. D. Geers, Gradient-enhanced damage modeling of concrete fracture, *Mech. Cohes. -Fric. Mater.*, 3, pp.323-342, 1998.
 - 17) Bazant Z. P., Oh B. H. : Crack band theory of concrete, *Materials and Structures* 16, pp.155-177, 1983.
 - 18) 三島隆路, 尾崎竜太郎, 森泉和人, 白井伸明：RC造柱・梁接合部の破壊モードと変形性状に関する2-Dおよび3-D解析, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, 構造IV, pp.445-450, 2003.
 - 19) 大岡督尚, 橋高義典：繊維補強コンクリートの破壊パラメータに及ぼす材齢の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.241-246, 1998.
 - 20) Y. Sonoda, N. Murato and H. Hikosaka : A fundamental study on deterioration of the existing RC beam by chemical and mechanical damage, *Fatigue Damage of Materials Experiment and Analysis, Advances in Damage Mechanics Volume 5*, pp.295-306, 2003.
 - 21) MSC.Software : *Marc 2014 Volume D, User Subroutines and Special Routines*

(2020年9月15日受付)

(2021年2月1日受理)