

論文 DFRCC の曲げ性能に及ぼす繰返し载荷の影響の評価

鬼塚 由佳*1・金久保 利之*2

要旨: DFRCC の曲げ性能に与える繰返し载荷の影響を把握するため、単調载荷および繰返し载荷による三等分点曲げ試験を行った。実験の結果、モーメント-曲率関係は繰返し载荷においてスリップ型の履歴を示すとともに荷重の低下が確認され、最大モーメントは単調载荷時の 60%~70%の値を示した。開口しているひび割れに作用する圧縮力がひび割れを架橋している繊維に影響を与え、その後引張に転じることで引張性能が低下するものと考えられる。この結果をふまえて、DFRCC の応力-歪モデル、繰返し履歴則および引張応力低下則を提案し、断面解析を行った。解析結果は、履歴属性の実験結果を良く表現した。

キーワード: DFRCC, 曲げ試験, 繰返し载荷, 応力-歪モデル, 断面解析

1. はじめに

高靱性繊維補強セメント複合材料 (以下、DFRCC) とは、曲げ・引張応力下において複数ひび割れを生じ、たわみ硬化や歪硬化という特徴を有するセメント系材料である。DFRCC を構造部材に適用した場合、ひび割れ発生後も繊維がひび割れを架橋することでひび割れの開口を防ぐため、高耐久な部材とすることが可能となる。

著者らは、バルコニー片持ちスラブ先端部分をプレキャスト化した部材 (以下、PCa 部材) に、DFRCC を適用した工法を提案している¹⁾。DFRCC の引張性能に期待し、内部を無筋とした DFRCC の PCa 部材に、手摺部分、スラブ部分を普通コンクリートで後打ちとした試験体を作製し、正負交番繰返し加力実験を行ったところ、実験値が危険断面の断面解析値を大きく下回る結果が得られた。これは繰返し载荷が DFRCC の曲げ性能に影響を及ぼしているものと考えられるが、DFRCC の曲げ性能には引張性能同様、繊維とマトリクス間の付着性状や繊維の配向角といった複数の要因が影響しており、DFRCC が受ける繰返し载荷の影響を各種要因に対して評価することは難しい。また、DFRCC の一軸引張圧縮繰返し実験を行った研究はいくつか報告されているが^{例えば 2)}、特殊な加力治具や加力装置が必要となり、種々の DFRCC や加力履歴に対して数多くの実験を行うことは容易ではない。一方、曲げ試験体に対する正負交番繰返し载荷は一軸引張圧縮繰返し実験より比較的容易に実験を行うことが可能である。DFRCC の繰返し応力-歪関係のモデルの構築を通して、断面解析を行い曲げ試験結果との適合性を検証することで、DFRCC の繰返し载荷による影響を評価することが可能であり、一軸繰返し性能を評価するための足掛かりになると考える。

本研究では、DFRCC を用いて単調载荷および繰返し载荷の曲げ試験を行い、その実験結果を元に、DFRCC

の応力-歪モデルおよび繰返し構成則を構築し、断面解析によって繰返し载荷が DFRCC の曲げ性能に及ぼす影響を評価することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体および使用材料

試験体は、JIS A 1106 に規定されている 100×100×400mm の角柱試験体作成用鋼製型枠を用いて作製し、蒸気養生後、実験室で気中養生とした。PVA 繊維の体積混入率 V_f は 1.5% と 2.0% の 2 種類とし、試験体は各 24 体ずつ全 48 体作製した。使用材料の調合計画、使用繊維の材料特性および試験体一覧をそれぞれ表-1、表-2 および表-3 に示す。試験体作製においては繊維の配向性を考慮し、パイプレータ等の機器を用いずに打設を行った。

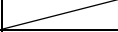
表-1 調合計画

名称	W/C	S/B	空気量(%)
DFRCC	0.42	0.77	10

表-2 使用繊維

種類	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	破断強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
PVA 繊維	12	0.04	1600	40

表-3 試験体一覧

試験体名	V_f (%)	加力方向	加力履歴		
V20-M	2.0	単調载荷(M)			
V20-C1A				片側繰返し载荷(C1)	A
V20-C1B					B
V20-C1C		C			
V20-C2A		正負交番繰返し载荷(C2)		A	
V20-C2B				B	
V20-C2C				C	
V15-M	1.5		単調载荷(M)		
V15-C1A		片側繰返し载荷(C1)			A
V15-C1B					B
V15-C1C			C		
V15-C2A		正負交番繰返し载荷(C2)	A		
V15-C2B			B		
V15-C2C			C		

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (正会員)

*2 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

実験因子は後述の3種類の加力方向（単調載荷，片側繰返し載荷，正負交番繰返し載荷），3種類の加力履歴（A，B，C）および V_f とし，各実験因子について3体ずつ加力を行った。なお加力に1ヶ月程度要したため，材令による影響を確認するために，単調載荷のみ試験開始時（材令29日）と試験終了時（材令60日）に3体ずつ加力を行った。

2.2 加力方法

加力装置を図-1に示す。加力は「曲げモーメント-曲率曲線試験方法」(JCI-S-003-2007)に準拠し，単調載荷(M)，片側繰返し載荷(C1)，正負交番繰返し載荷(C2)の3種類の方法で行った。歪は試験体側面の上下に配したπ型変位計によって計測し，平面保持の仮定により曲率を算出した。

繰返し載荷は，加力方向に対して引張側の歪計の歪の値（以下，引張歪）をモニター値として加力を行った。また正負交番繰返し載荷では，正側の載荷を行った後，試験体の上下を反転し，負側の加力を行った。

2.3 加力履歴

加力履歴を図-2に示す。加力履歴は単調載荷(V20-M)の実験結果より，引張歪で0.1%（初期ひび割れ発生後），0.5%（複数ひび割れ発生時），1.0%（ひび割れ局所化時）を基準に決定し， V_f によらず同一の加力履歴とした。加力履歴Aでは0.1%，0.5%，1.0%の各目標引張歪で3回ずつ，加力履歴Bでは目標引張歪が0.1%で1回，0.5%で10回繰り返す，その後荷重が低下するまで加力することとした。また加力履歴Cは目標引張歪を0.1%ずつ漸増させるものとし，荷重の低下を確認もしくは目標引張歪が3.0%に達するまで加力を行うこととした。なお片側繰返し載荷では除荷後に引張歪は0にならないため，荷重が0になった時点で再載荷を開始した。

3. 実験結果

3.1 モーメント-曲率関係と破壊状況

単調載荷試験体のモーメント-曲率関係（以下， $M-\phi$ 関係）を図-3に， V_f が2.0%で繰返し載荷を行った試験体の $M-\phi$ 関係の例を図-4に，試験体V20-C2の純曲げ区間の最終ひび割れ状況を図-5に示す。なお，図-3（V20-M）には後述する断面解析から得られた解析値もあわせて示す。

単調載荷した全ての試験体でたわみ硬化，複数ひび割れを確認した。また，試験開始時と試験終了時に加力した試験体の相違はほとんど見られなかったため，材令による差異はないものとして取り扱う。試験体V15-Mは，試験体V20-Mと比較してひび割れ本数が少なく，2本目のひび割れが発生した直後にひび割れ開口が局所化する試験体が多くみられ，強度，変形能ともに劣っていた。

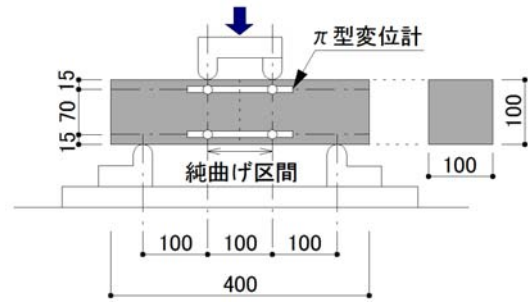


図-1 加力装置

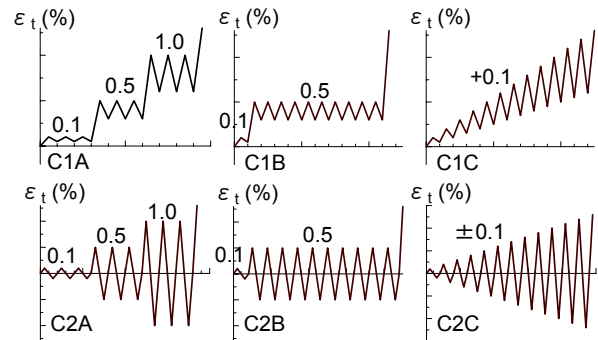


図-2 加力履歴（上：片側，下：正負交番）

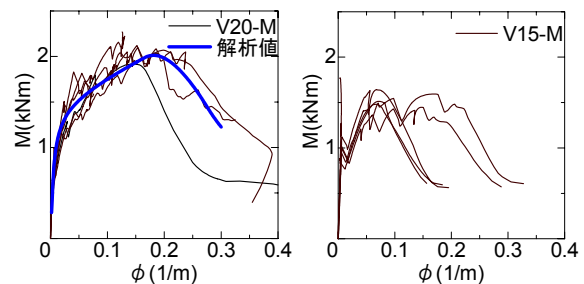


図-3 単調載荷試験体の $M-\phi$ 関係

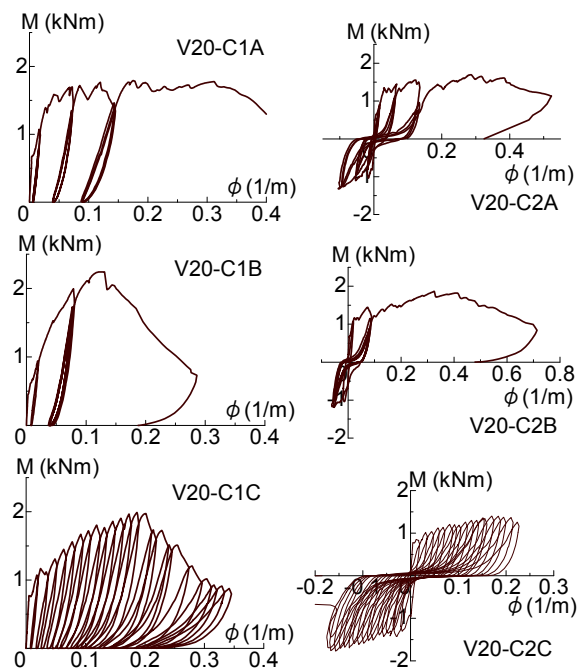


図-4 繰返し載荷試験体の $M-\phi$ 関係



図-5 最終ひび割れ状況

繰返し荷重においては、いずれの試験体も引張歪が未経験の歪に達するまで新しいひび割れは観測されなかった。ひび割れの発生本数が多く、ひび割れ間隔が均等に生じている試験体ほど最大荷重が大きくなる傾向があった。また全ての試験体でスリップ型の履歴を示し、同一の目標引張歪で繰り返した場合、繰返し回数が増えるにつれピーク時の荷重が低下することを確認した。

片側繰返し荷重では、除荷後における残留引張歪の値は経験した最大引張歪の50%から70%程度であり、最大歪が大きくなるにつれ残留歪の割合も大きくなった。また、試験体 V15-C1A では引張歪が1.0%前後で終局に至り、それ以降の加力を行うことはできなかった。

正負交番繰返し荷重試験体では、正側加力で生じたひび割れにつながるように負側の加力でひび割れが発生し、加力履歴によってひび割れの発生状況が異なった。加力履歴 A では、引張歪が未経験の歪に達する最初の加力サイクルでひび割れが発生し、最終サイクルにおいても引張歪から新たなひび割れが生じた。加力履歴 B では、加力初期段階におけるひび割れ発生状況は加力履歴 A と同様であったが、最終サイクルでは開口していたひび割れの先端から枝分かれするように新しいひび割れが発生した。同一の引張歪で繰返し荷重を10回行ったことで、ひび割れを架橋している繊維の負担応力が低下し、その部分のひび割れが切欠けのような状態になったことで、切欠け上部において応力の再分配が起きたと考えられる。また加力履歴 C においては、未経験の引張歪に達した直後に除荷を開始することになるため、ひび割れがあまり生じず、加力初期段階で発生したひび割れにおいて破壊に至った。

片側繰返し荷重および正負交番繰返し荷重（正側加力）試験体の $M-\phi$ 関係包絡線を図-6 に示す。なお、比較を行うために単調荷重試験体の結果も同図に示した。片側繰返し荷重の V20-C1, V15-C1 試験体では、単調荷重との大きな差異が見られないが、正負交番繰返し荷重の試験体 V20-C2, V15-C2 では、モーメントの値が低下している。これより繰返し荷重の影響による荷重低下は、引張歪と圧縮力が繰返し作用することが原因と考えられ、一度開口したひび割れに圧縮力が作用することで、繊維の架橋効果に影響を与えているものと思われる。

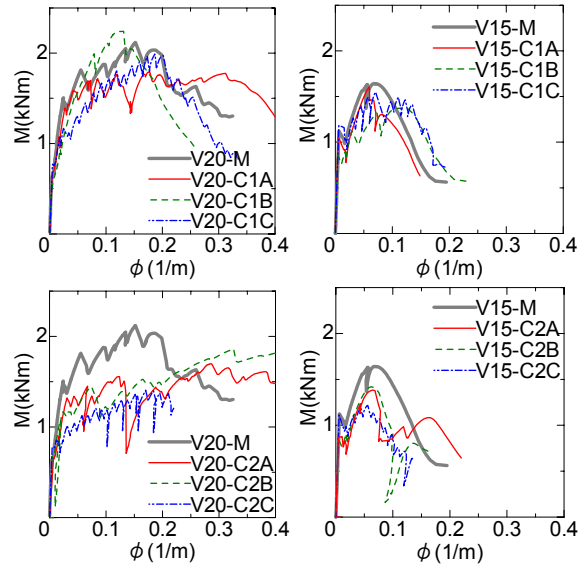


図-6 繰返し荷重試験体の包絡線

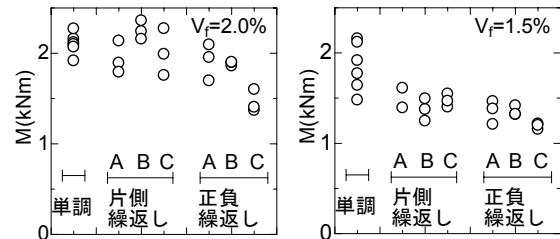


図-7 最大荷重の比較

3.2 最大荷重

各試験体の最大モーメントを図-7 に示す。片側繰返し荷重試験体では単調荷重試験体に比べて最大荷重の低下はほとんど見られなかったが、正負交番繰返し荷重では最大荷重が低下する傾向にあった。最も荷重が低下していた加力履歴 C では単調荷重の60%から70%となった。また $V_f=1.5\%$ の試験体では、繰返し荷重による荷重低下率が $V_f=2.0\%$ の試験体より大きいことから、繊維架橋能力の発揮の程度によっても繰返し荷重の影響が変化するものと思われる。

3.3 耐力比

加力履歴 A, B 試験体について、同一引張歪加力サイクル1回目のピーク荷重と2回目以降のピーク荷重の耐力比とサイクル数の関係を図-8 に示す。耐力比は、同一因子試験体3体の平均値を示し、正負交番繰返し荷重では、正側加力、負側加力それぞれについて算出した。

加力履歴 A では、加力サイクル目標引張歪の違いによる耐力比の差異はほとんど見られなかった。加力履歴 B では、繰返し载荷による荷重の低下が明瞭に確認できる。また、片側繰返し载荷に比べて正負交番繰返し载荷の耐力比は小さくなる傾向がみられた。これは、片側繰返し载荷において見られた同一歪領域における繰返し回数に応じた荷重低下に、正負交番加力による荷重低下の影響が加わることによるものと考えられる。

4. 断面解析

曲げ試験により、繰返し载荷の影響による荷重低下が確認された。この主たる要因として、繰返し回数および圧縮力と引張力の交番作用が考えられる。本章では、引張応力下の履歴特性に関してこの荷重低下を表現する DFRCC の応力-歪モデルの構築を行い、そのモデルを用いた繰返し载荷断面曲げ解析によって検証を行った。なお、モデルの構築および解析は $V_f=2.0\%$ の試験体に対してのみ行った。

4.1 応力-歪モデル

(1) 包絡線

モデルに用いた DFRCC の特性値を表-4 に、応力-歪関係の包絡線モデルを図-9 に示す。引張側はトリリニアモデル、圧縮側は放物線モデルとした。引張側は、単調载荷の実験結果をもとに、初期ひび割れ発生時および最大荷重時のモーメントと曲率から、それぞれひび割れ発生時の応力 σ_{cr} 、歪 ε_{cr} 、引張強度時の応力 σ_t 、歪 ε_t を算出した³⁾。また、終局歪 ε_{tu} は、予備的な単調载荷の断面解析により、 $M-\phi$ 関係が実験結果と対応するように決定した。また圧縮側は、圧縮強度試験結果から得られた圧縮強度 σ_c と割線剛性 E により放物線モデルを決定した。単調载荷の解析結果は図-3 に示した。

(2) 引張側履歴

DFRCC の引張側の履歴モデルは、ひび割れ発生歪 ε_{cr} までは線形弾性とし、ひび割れ発生後の歪硬化・軟化領域でスリップ特性を表現できるように配慮した。また、実験結果より得られた除荷後に残留歪を生じ、同一歪領域での繰返し回数に応じて応力が低下するという特性を考慮したモデルとした。履歴モデルを図-10 に示す。

履歴中で経験した最大引張歪の点を A、除荷終了点を B、歪の進行方向が負方向から正方向に転じる点(引張応力下における再载荷開始点)を I、再载荷曲線の目標点を G、歪の進行方向が正方向から負方向に転じる点(引張応力下における除荷開始点)を J とする。

除荷時は J 点から B 点に向かう除荷曲線に従うものとし、再载荷時は再载荷曲線上で I 点から G 点を通り、包絡線に向かうものとした。除荷・再载荷曲線の曲線形状および変数決定条件を図-11 に、曲線の式を(1)式に示す。

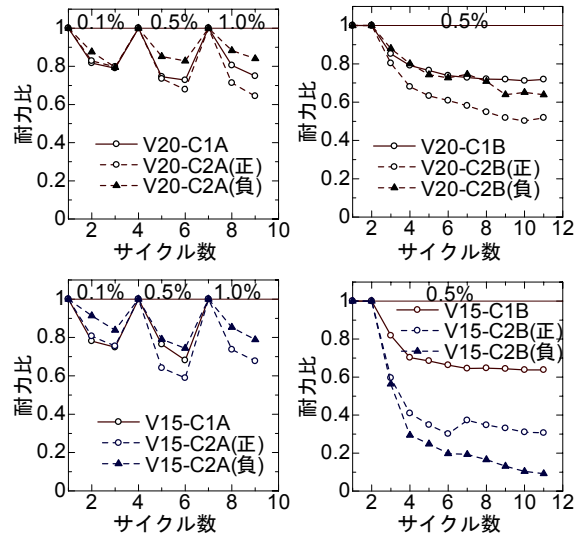


図-8 各サイクルピーク荷重耐力比の推移

表-4 応力-歪関係の特性値

圧縮側		引張側				
σ_c (MPa)	E (GPa)	σ_{cr} (MPa)	ε_{cr} (%)	σ_t (MPa)	ε_t (%)	ε_{tu} (%)
38.2	14.7	3.78	0.02	5.24	1.35	2.35

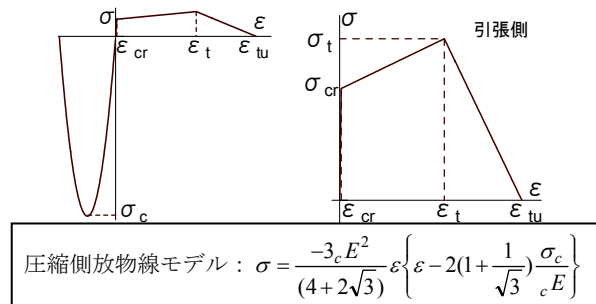


図-9 応力-歪関係の包絡線モデル

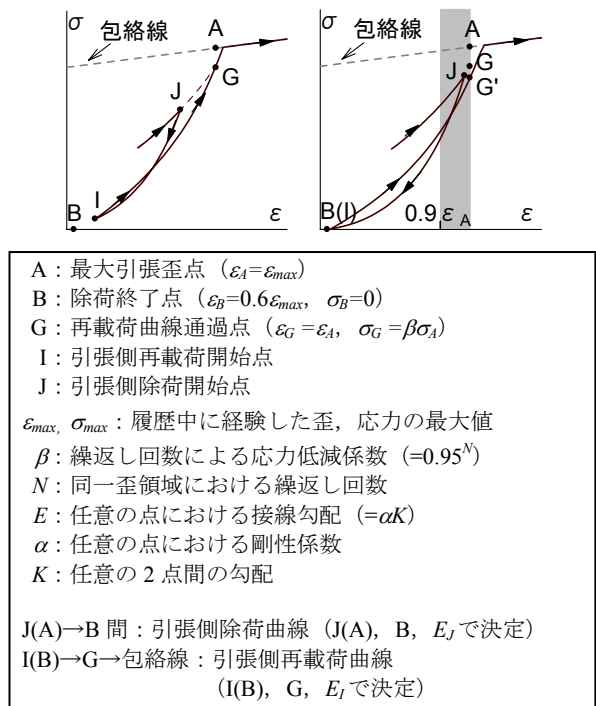


図-10 引張側履歴モデル

除荷曲線，再載荷曲線は2点の座標および1点の接線勾配によって，変数 a, b, c を決定する。接線勾配 E は2点間の勾配 K と剛性係数 α の積で与えるものとし， α は実験と対応するように決定した。引張応力下における α_j ， α_l を(2)式に示す。

$$\sigma = a(e^{x^2} - 1) + bx + c \quad (1)$$

$$x = (\varepsilon - \varepsilon_0) / (\varepsilon_p - \varepsilon_0)$$

$$\alpha_j = 3.0 \quad (2)$$

$$\alpha_l = 0.6 - (\varepsilon_c - \varepsilon_l) \times 100 \geq 0.2$$

また図-10右図に示しているように，繰返し回数 N ，応力低減係数 β を用い，応力低下条件を満たした場合に G 点の応力を G' 点に低下させることで同一歪領域での繰返しによる応力低下を表現する。 β は実験結果をもとに，繰返し回数が増えるにつれ低下率が小さくなるよう 0.95^N とした。応力低下は繊維とマトリクス間のすべりによって生じていると考え，歪が ε_A 近傍(図-10右図網掛け部分)で除荷に転じ，なおかつ除荷が残留歪の値 (B 点)に達した時点で応力が低下するものとした。応力低下条件を以下に示す。

$$0.9\varepsilon_A \leq \varepsilon_j \leq \varepsilon_A \cap \varepsilon_l \leq \varepsilon_B \quad (3)$$

(3) 圧縮側履歴

圧縮側の履歴モデルを図-12に示す。引張応力下でひび割れ発生後除荷を行うと，荷重0の時点では残留歪が残るため，その後ひび割れが閉口する過程においては圧縮応力が生じているものと考えられる。引張歪-圧縮応力状態を考慮して圧縮側のモデル化を行った。

圧縮側包絡線上で応力が $-\sigma_{max}$ である点を C ，履歴中に経験した最小歪点を D ，圧縮応力から引張応力へ転じる場合のすべり終了点を F ，原点を O とする。引張歪-圧縮応力状態を表現するため， B 点から C 点に向かう圧縮移行曲線を式(4)のように定義した。

$$\sigma = a(1 - e^{-3x}) + \sigma_c \quad (4)$$

$$a = -\sigma_c / (1 - e^{-3})$$

$$x = (\varepsilon - \varepsilon_c) / (\varepsilon_B - \varepsilon_c)$$

C 点に到達後は，圧縮側包絡線に従うものとする。また，圧縮移行区間 (BC 間)での除荷・再載荷は，傾き $0.5E$ の直線に従うこととし， C 点より歪が小さい区間では圧縮側除荷開始点 I から O 点に向かう圧縮側除荷曲線，および圧縮側再載荷開始点 J から， D 点に向かう再載荷曲線で繰り返すこととした。除荷・再載荷曲線は引張側と同様に式(1)を用い，除荷曲線は I 点と O 点，および I 点の接線勾配から，再載荷曲線は J 点と D 点および J 点における接線勾配により決定する。なお，圧縮応力下では α_l を 2.5 ， α_j を 0.85 とした。

圧縮応力から引張応力に転じる場合， F 点までは非常に小さな勾配で歪が進行するものとし， F 点に達した後， F 点と G 点から定まる引張側再載荷曲線に従うものとし

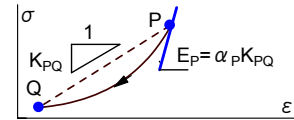
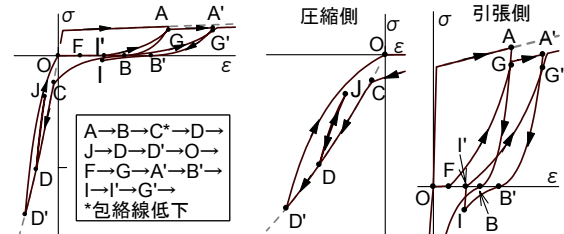


図-11 除荷曲線および再載荷曲線



- C : 圧縮移行曲線と圧縮側包絡線の交点 ($\sigma_C = -\sigma_{max}$)
 - D : 最小歪点 ($\varepsilon_D = \varepsilon_{min}$, $\sigma_D = \sigma_{min}$)
 - F : すべり終了点 ($\varepsilon_F = 0.4\varepsilon_{max}$, $\sigma_F = 0$)
 - I' : 圧縮側除荷直線終了点 ($\varepsilon_{I'} = \varepsilon_l + \sigma_l / 0.5E$, $\sigma_{I'} = 0$)
 - O : 原点
- ε_{min} , σ_{min} : 履歴中に経験した歪，応力の最小値
 γ : 包絡線低減係数 (=0.9)
- A→B 間 : 引張側除荷曲線
 - O→F→G→引張側包絡線 : 引張側再載荷曲線
 - B→C(I)間 : 圧縮移行曲線 (B, C で決定)
 - I→I'間 : 圧縮側除荷直線 (I 点を通る傾き $0.5E$ の直線)
 - C→D 間 : 圧縮側包絡線
 - D→J(D'→O)間 : 圧縮側除荷曲線 (D, E_D で決定)
 - J→D→圧縮側包絡線 : 圧縮側再載荷曲線

図-12 圧縮側履歴モデル

た。また，圧縮側除荷直線と ε 軸との交点を I' とすると，図-12右図に示すように $\varepsilon_F < \varepsilon_{I'}$ となった場合は， I' 点と G' 点から定まる引張再載荷曲線上を G' 点に向かうものとした。

(4) 引張側包絡線の低減

実験より得られた正負交番繰返し加力による荷重低下は，引張-圧縮応力の繰返しの履歴によって引張応力が低下するものと考えられる。したがって，この特性を引張側包絡線の応力低下によって表現するものとした。図-12に示すように，引張側履歴において A 点に達した後に，同じ履歴サイクルの圧縮応力下で C 点に達することを応力低下条件とし，条件を満たした場合，引張側包絡線の応力値 σ_{cr} ，および σ_l を低減係数 γ 倍にすることで引張側包絡線を低下させた。なお， γ は実験結果との対応により 0.9 とし，引張側再載荷曲線は引張側包絡線を決して超えないものとした。

4.2 断面解析結果

前節で提案した応力-歪モデルを用い，実験によって得られた試験体の曲率を入力値として与え，繰返し断面解析を行った。断面解析より得られた $M-\phi$ 関係の例 ($V20-C1C$, $V20-C2C$) を図-13に，あるサイクルにおける実験結果と断面解析結果の $M-\phi$ 関係の履歴ループの比較 ($V20-C2C$) を図-14に，片側繰返し載荷および正

負交番繰返し荷重解析結果の $M-\phi$ 関係の包絡線を図-15に示す。なお、図-13には試験体3体の実験結果包絡線もあわせて示した。

図-13より、解析結果は実験結果のスリップ型履歴をよく再現できており、加力履歴Cにおける $M-\phi$ 関係も実験結果とよく対応している。また図-14に示したサイクルごとの履歴は、加力初期段階での履歴は多少異なっているものの、加力が進むにつれ断面解析で得られた履歴ループは実験結果を追従できており、提案した応力-歪モデルの適合性は良いと考えられる。また解析によって得られたモーメントの最大値と実験結果の最大値との比較（解析値/実験値）を行ったところ、平均で0.92となり解析値が精度よく対応していた。図-15において、片側繰返し荷重の解析結果は単調荷重の解析結果と差異のない $M-\phi$ 関係の包絡線が得られ、正負交番繰返し荷重では単調荷重より荷重が低下しており、図-6に示した実験結果の包絡線と適応している。しかし正負交番繰返し荷重において、実験結果の終局時曲率は単調荷重の曲率より大きくなる傾向があったのに対し、解析結果では単調荷重と同等の結果となった。繰返し荷重がDFRCCの変形能へも影響を与えているものと考えられるが、提案した応力-歪モデルでは変形能への影響が考慮されていないため、今後繰返し荷重による変形能への影響を把握し、応力-歪モデルの構成則を検討する必要があると思われる。

5. まとめ

繰返し荷重によるDFRCCの曲げ性能への影響を評価するため、繰返し曲げ試験を行い、その結果を元にDFRCCの応力-歪モデルを構築し断面解析により検証した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 繰返し荷重においては、 $M-\phi$ 関係はスリップ型の履歴を示した。
- (2) 圧縮力と引張力の繰返し作用がひび割れを架橋している繊維に影響を与え、荷重が低下すると考えられる。
- (3) 繰返し荷重による最大荷重の低下は、最大で単調荷重の60%から70%となることを確認した。
- (4) 正負交番繰返しおよび繰返し回数の影響による荷重低下を考慮した応力-歪モデルによる断面解析を行った結果、実験結果に類似したスリップ型の履歴を示し、実験値を追従することができた。

謝辞

試験体の作製にあたっては、鹿島建設株式会社技術研究所、興建産業株式会社のご協力を得た。

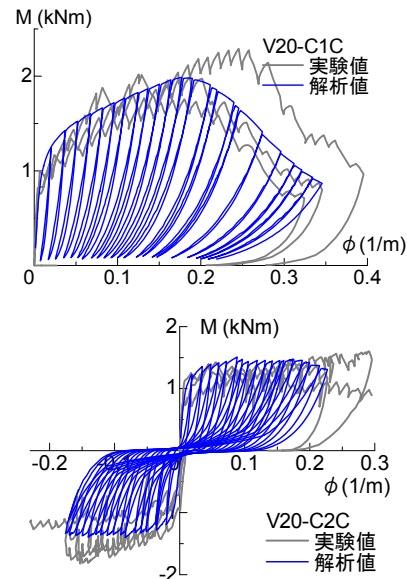


図-13 繰返し断面解析結果例

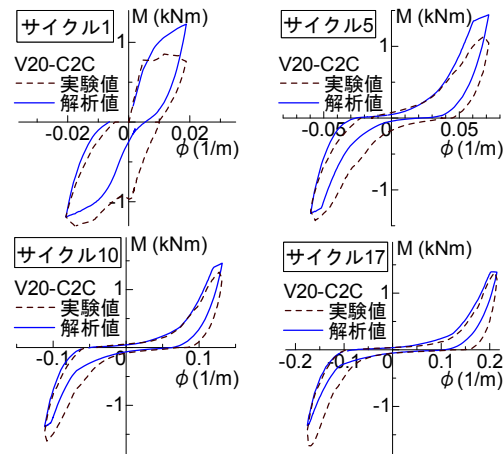


図-14 $M-\phi$ 関係の履歴ループ比較

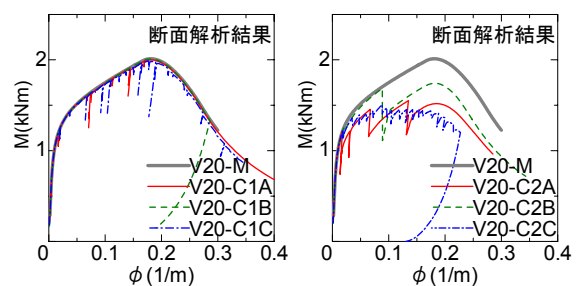


図-15 断面解析結果の包絡線

参考文献

- 1) 鬼塚由佳, 迫 法道ほか: パルコニー先端 PCa 部材へのDFRCCの適用に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, スラブ(2), pp.632~pp.633, 2008,9
- 2) 佐藤幸博, 福山 洋, 金久保利之: 高靱性型セメント系複合材料の基本的力学特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol21, No3, pp.1435~pp.1440, 1999
- 3) 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会 報告書(II), 日本コンクリート工学会, 2004, 5