

論文 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材の応力-ひずみ関係の逆解析

河合 正則*1・稲熊 唯史*2・内田 裕市*3・六郷 恵哲*4

要旨：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材の引張応力-ひずみ関係を曲げ試験で得られるモーメント-曲率関係から逆推定する方法について検討した。モーメント-曲率関係の開始点から逐次逆解析を行なうことで、引張応力-ひずみ関係を求めることが可能であること、ならびにひずみレベルの小さい領域では逆解析の結果が一軸引張試験で得られる結果と整合することを確認した。

キーワード：繊維補強セメント複合材, 引張-応力ひずみ関係, 複数ひび割れ, ひずみ硬化

1. はじめに

「複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材 (HPFRCC: High Performance Fiber Reinforced Cement Composite) ¹⁾」は、引張応力の増加に伴って、幅の小さなひび割れが次々に生じ、巨視的には完全塑性あるいはひずみ硬化を生じる材料である。この HPFRCC の引張性能を評価するには一軸引張試験が望ましいと考えられるが、実務レベルでは必ずしも容易ではない。そこで本研究では試験が容易な曲げ試験の結果から、HPFRCC の引張応力-ひずみ関係を逆推定する方法について検討した。

2. 逆解析の概要

本解析は断面解析 (ファイバーアナリシス) を基本としており、材料の応力-ひずみ曲線を与えることでモーメント-曲率関係 (M-φ) を求める順解析に対して、M-φ 関係から応力-ひずみ関係を逆推定するものである。

図-1 に解析フローを示す。断面の引張縁のひずみを増分パラメーターとして、各ステップでは引張縁ひずみに対して引張応力を仮定し、計算される M-φ が実験での M-φ 曲線上に乗る

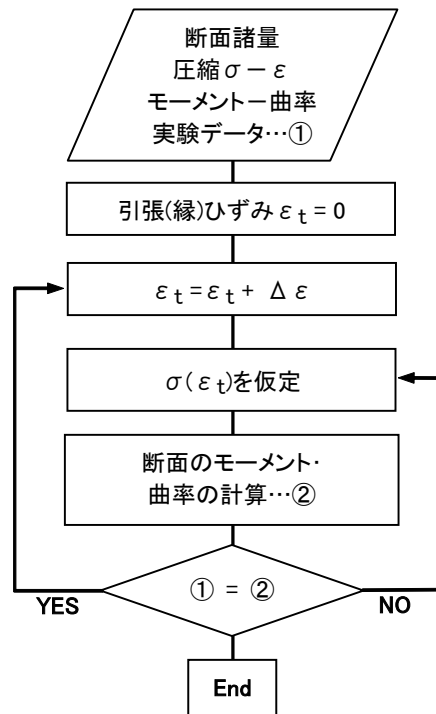


図-1 解析フロー

ような引張応力を求める。次のステップでは、前ステップまでに求められた引張応力-ひずみ曲線は変更せず、引張ひずみを増分した分のみの応力を同定するようにしている。

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*2 ジェイアール東海コンサルタンツ (株) 開発技術部 技術開発第一課 (正会員)

*3 岐阜大学 総合情報メディアセンター 教授 工博 (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

3. 逆解析の精度の確認

3.1 基本的な解析精度

本解析の精度を確認するために、断面寸法を100×100mmとして、**図-2**に示すような引張応力-ひずみ関係と**図-3**に示すような圧縮応力-ひずみ関係を入力値として、**図-4**のようにM- ϕ 曲線を順解析し、これを逆解析することで引張応力-ひずみ関係を逆推定してみた。その結果、**図-2**に示すように解析値はほぼ入力値に一致することが確認された。

3.2 JCI の評価法との比較

日本コンクリート工学協会 (JCI) から、曲げ試験の結果から引張強度および引張終局ひずみを算定する方法²⁾(以下、JCI法と呼ぶ)が提案されている。これは、曲げ試験における最大荷重時の曲げモーメントおよび曲率を用いて、完全塑性型の応力-ひずみ関係を仮定して引張強度と引張終局ひずみを評価するものである。ここではJCI法によって得られる結果と本解析法によって得られる結果を比較することとした。

図-5に示すような曲げモーメント-曲率関係が曲げ試験で得られたと仮定し、JCI法と逆解析の比較を行なった。なお、これら3種類の曲線は、繊維補強セメント複合材で考えられる典型的な引張応力-ひずみ曲線として、**図-6**に示すようなひび割れ発生後、軟化 (A)、完全塑性 (B) および硬化 (C) の3種類を仮定して計算したものである。ただし、軟化型は、厳密には破壊の局所化を伴うため、断面解析は適用すべきではないが、ここでは軟化しながらも破壊は一様に分散すると仮定して逆解析を行なった。

逆解析とJCI法によって推定を行なった結果を**図-6**に示す。これらの結果から、完全塑性型 (B) では逆解析の結果とJCI法による値が完全に一致した。一方、軟化型と硬化型の場合には、特に終局ひずみが両者で大きく異なる結果となった。これは、JCI法では最大荷重時の曲げモーメントおよび曲率しか計算に用いておらず、それまでの途中の挙動を評価していないからである。

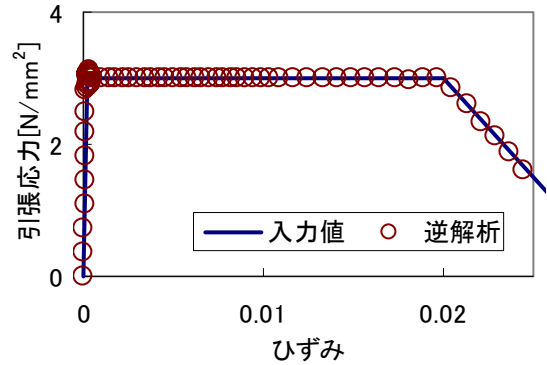


図-2 引張応力-ひずみ関係

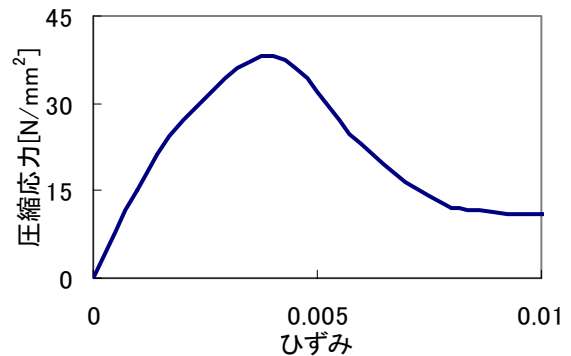


図-3 圧縮応力-ひずみ関係

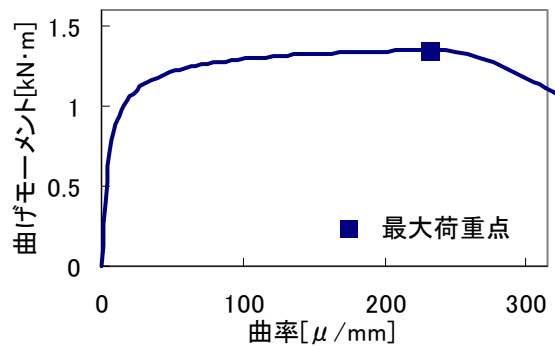


図-4 モーメント-曲率関係

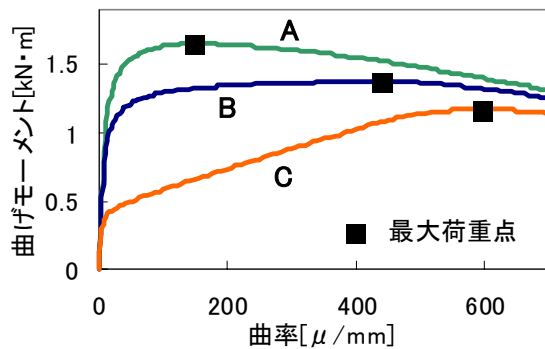


図-5 仮定したモーメント-曲率関係

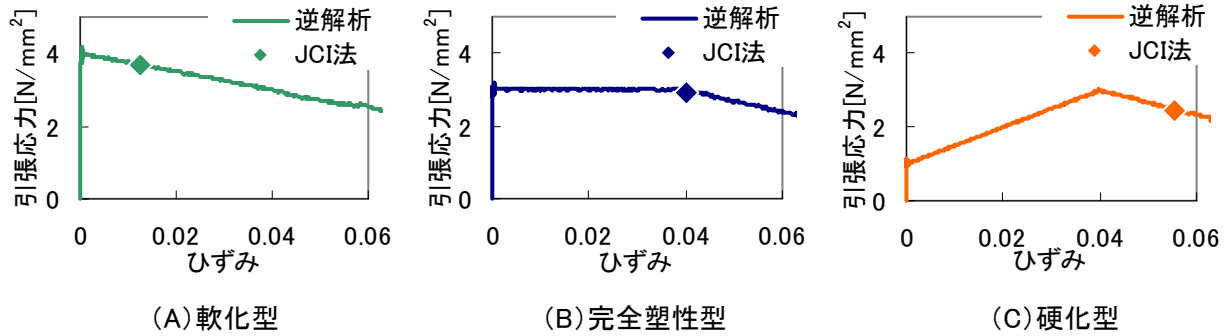


図-6 解析値と評価式との比較

4. 圧縮応力-ひずみ関係が解析結果に及ぼす影響

4.1 概要

本解析では、材料の圧縮応力-ひずみ関係をあらかじめ設定しておく必要がある。圧縮応力-ひずみ関係は、圧縮試験を行なうことで容易に得ることが可能であるが、実際に逆解析を行なうに当たって、圧縮応力-ひずみ関係が解析結果に対してどのような影響を与えるのかを検討しておく必要がある。

そこで、圧縮応力-ひずみ関係をパラメータとして逆解析のシミュレーションを行なうこととした。図-7に解析に用いた圧縮応力-ひずみ関係を示す。ここでは、圧縮応力-ひずみ関係として、圧縮強度点までは2次放物線としその後、塑性棚を経て直線軟化するモデルを仮定し、軟化開始点のひずみを3種類(図中、E,F,G)に変化させたものを用いた。また、引張応力-ひずみ関係については、図-8に示すものを用いた。なお、引張終局ひずみとして図-2に示したモデルに比べ大きな値としたのは、圧縮応力-ひずみ関係の影響を顕在化させるためである。

4.2 M-φ関係とJCI法に対する影響

図-9には、断面寸法を100×100mmとして計算したM-φ関係を示す。同図中には最大耐力点(max)，圧縮縁のひずみが応力-ひずみ曲線上の圧縮軟化開始点のひずみに達する点(C_sof)および引張縁のひずみが引張軟化開始点に達する点(T_sof)を曲率の値とともに示す。

M-φ関係の概形は圧縮応力-ひずみ関係が

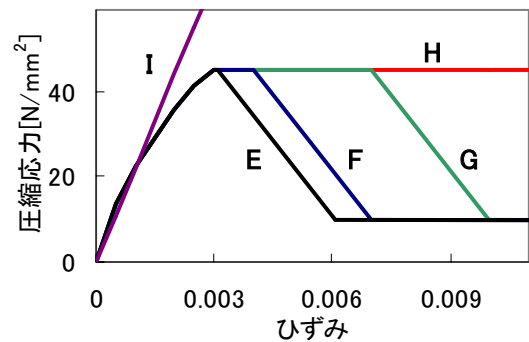


図-7 仮定した圧縮応力-ひずみ関係

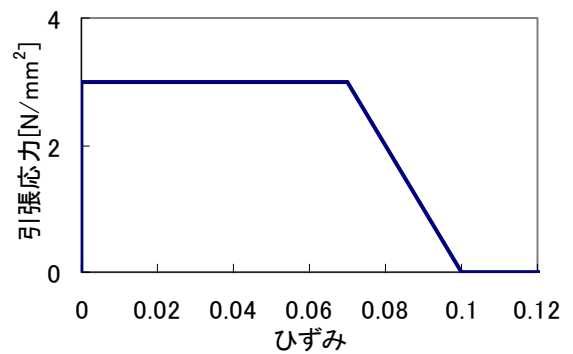


図-8 仮定した引張応力-ひずみ関係

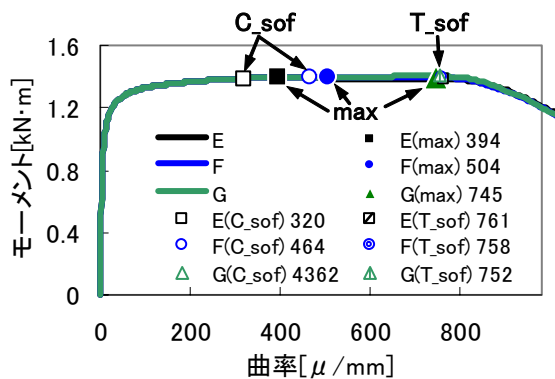


図-9 推定されたモーメント-曲率関係

変化してもほとんど差が見られない。しかし、詳細に見ると、最大耐力点に達するときの曲率は、圧縮応力-ひずみ関係の軟化開始点のひずみに対応して変化していることがわかる。また、E,F のケースでは最大耐力点に達する前に圧縮軟化が生じ、引張軟化より圧縮軟化の方が先行している。したがって、E,F のケースは圧縮軟化によって最大耐力に達しているのに対して、G のケースは引張軟化により最大耐力に達している。

図-9のM-φ関係に対してJCI法を適用した場合、引張応力-ひずみ関係が同一であっても、解析上では圧縮応力-ひずみ関係が異なるとM-φ関係上の最大耐力点の位置が変化し、終局引張ひずみとしてはそれぞれ異なった値が評価されることになる。しかしながら、圧縮応力-ひずみ関係が変化してもM-φ関係の概形はほとんど変化せず、また、実験においてはデータのバラツキや計測精度によって、図-9のような最大耐力点の位置の変化を読み取ることは不可能であると考えられるため、実用上、JCI法は圧

縮応力-ひずみ関係に対して鈍感であると考えられる。

4.3 逆解析に対する影響

次に、逆解析に対する圧縮応力-ひずみ関係の影響を検討するため、図-9中のGのM-φ関係が実験で計測されたとして、逆解析を行なう場合に、圧縮応力-ひずみ関係として図-7中のE,F,G,H(完全塑性),I(線形弾性)を用いて解析を行なった。

逆解析の結果を図-10に示す。当然のことであるが、Gから得られた結果は、入力値と一致している。一方、圧縮応力-ひずみ曲線として真値であるGより軟化開始点の小さいEおよびFを用いた場合には、引張応力-ひずみ曲線の塑性棚の途中から軟化開始点にかけて応力が上昇する現象が見られる。これは、EおよびFを用いた場合には、引張縁のひずみが塑性棚の範囲にあるにもかかわらず、圧縮縁が軟化域に入ってしまう、計算上はモーメントが減少するはずが、入力されたM-φ関係はモーメント低下を生じていないため、圧縮軟化によるモーメント

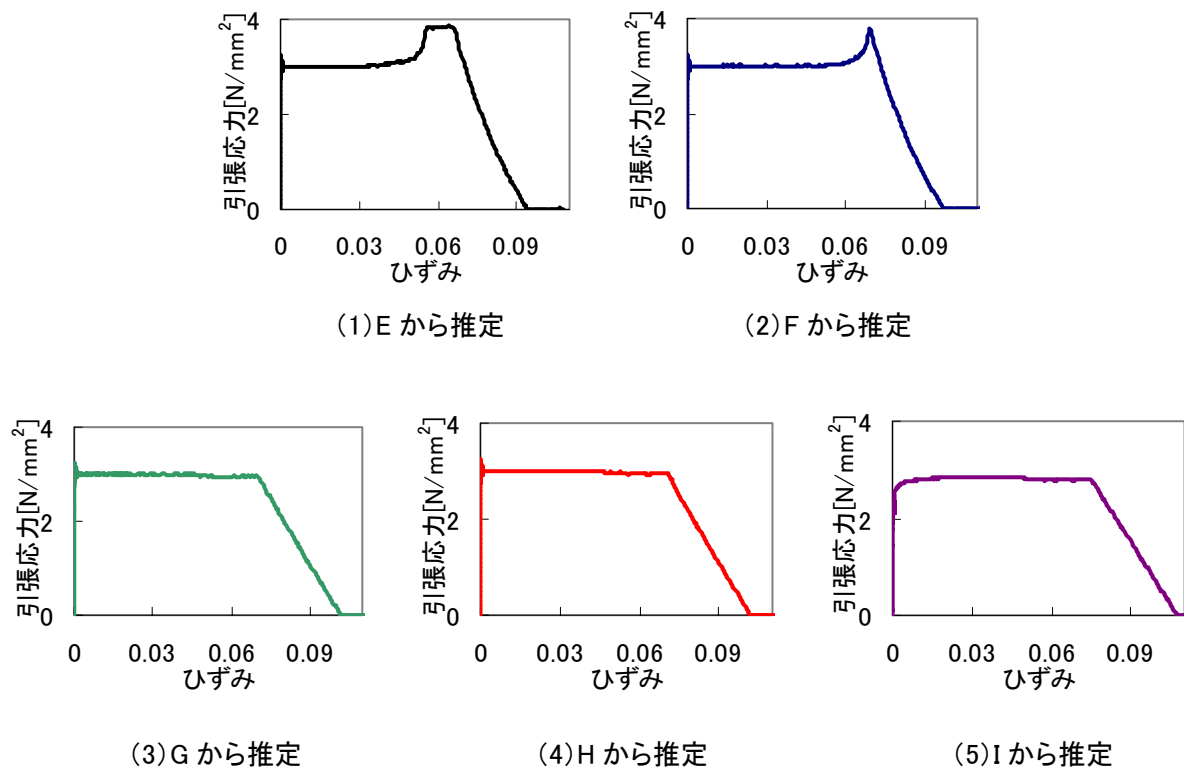


図-10 異なる圧縮応力-ひずみ関係から推定された引張応力-ひずみ関係

の低下分を引張応力を上昇させることで補っているためである。また、圧縮応力-ひずみ曲線として圧縮軟化を伴わない H を用いた場合には、解析結果はほぼ入力値に一致している。これは、本ケースの場合、M- ϕ 関係が軟化に入っても圧縮縁は軟化域に入らず、M- ϕ 関係の軟化に対して引張軟化が支配的になっているためであると考えられる。

なお、圧縮応力-ひずみ関係を線形弾性とした場合には、圧縮応力が真値より大きくなることにより、引張応力が若干低く推定されているが、曲線の概形は入力値とほぼ一致している。

以上のことより、逆解析に対して圧縮応力-ひずみ関係が影響する場合もあるが、実用上は完全塑性型の応力-ひずみ関係を採用すればその影響は回避できるものと考えられる。

5. 実験値への逆解析の適用例

5.1 概要

逆解析の有効性を確認する目的で、実験値を用いて解析を行なった。実験では PE 繊維を 1.5% 混入した複数微細ひび割れ型繊維補強セメントに対して、同一バッチの材料で製作した一軸引張供試体と曲げ供試体についてそれぞれ試験を行ない、引張応力-ひずみ関係と M- ϕ 関係を計測した。実験で計測された M- ϕ 関係に対して逆解析を適用して引張応力-ひずみ関係を求め、これと実験で得られた引張応力-ひずみ関係を比較することとした。

直接引張試験には図-11 に示すように、ダブル型の供試体を用いた。供試体の試験区間の断面寸法は 30×30mm であり、検長を 100mm とし平均引張ひずみを計測した。また、荷重は供試体の両端をピン支持として変位速度を一定として行った。

曲げ供試体には 100×100×400mm の角柱供試体を用い、スパンを 300mm とし 3 等分点荷重を行った。荷重試験時に荷重点直下 2 点とスパン中央の 3 点のたわみを測定し、等モーメントスパン内の平均曲率を求めた。

5.2 実験および解析結果

図-12 と図-13 に実験で計測された引張応力-ひずみ関係と M- ϕ 関係を示す。各試験とも供試体を 3 体ずつ用いたが、いずれの試験においても、3 体のうち 1 体のみが他の 2 体の結果と大きく異なる結果となった。

逆解析を行なうにあたり、圧縮応力-ひずみ関係については、強度点までは圧縮試験で得られた値を用い、強度点以降については完全塑性型と仮定した。また、M- ϕ 関係については、計測値をそのまま用いると、計測値のわずかな振動により、逆解析の結果が振動し、場合によっては解が収束しなくなることがあるため、平滑化したものを用いることとした。なお、計測された M- ϕ 関係にはバラツキがあったため、平均化せずに 2 体の計測結果をそれぞれ平滑化し

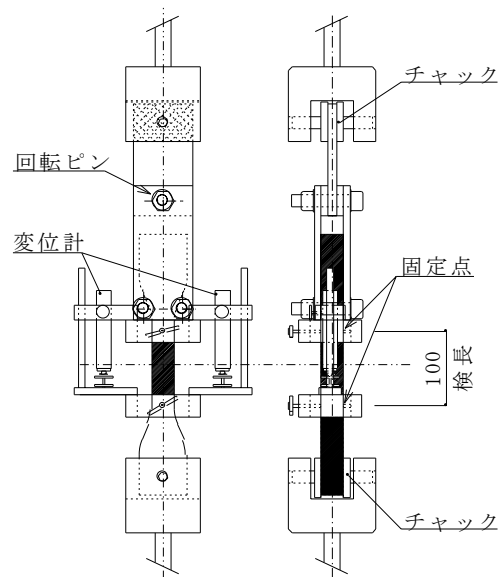


図-11 直接引張試験方法

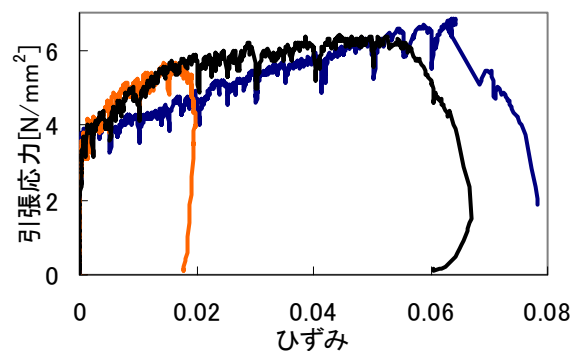


図-12 引張応力-ひずみ関係の実験値

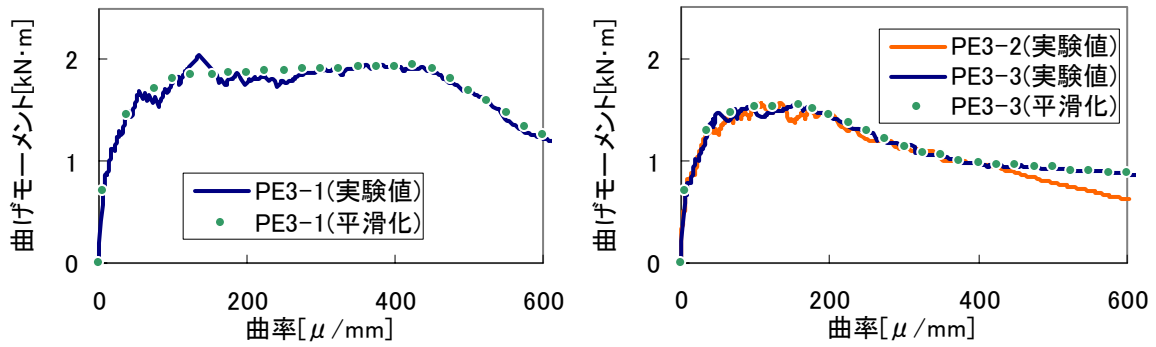


図-13 モーメントー曲率関係の実験値とその平滑化

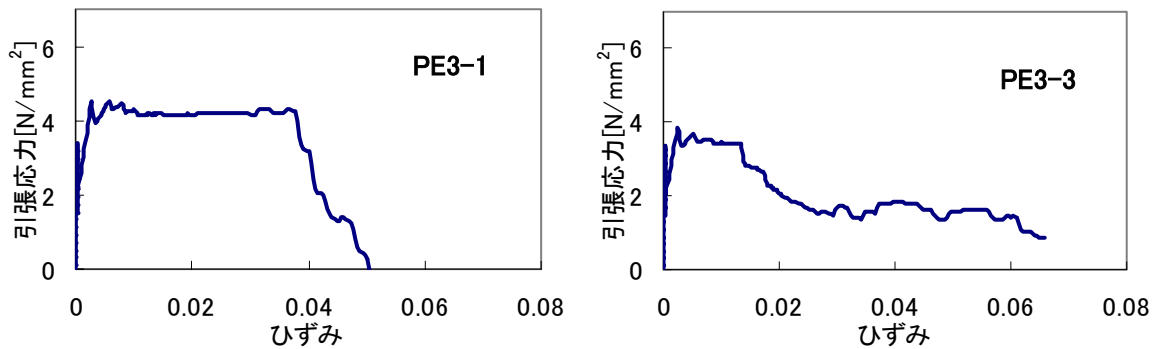


図-14 引張応力ーひずみ関係の解析値

て解析をおこなった。

図-14 に逆解析で得られた引張応力ーひずみ関係を示す。解析に用いた $M-\phi$ 関係に差があるため、当然のことながら引張応力ーひずみ関係にも差が見られるが、ひずみが 1.5%以下の範囲では2本の結果はほぼ一致している。一方、推定された引張応力ーひずみ関係と計測された引張応力ーひずみ関係を比較すると、降伏開始点の応力はほぼ一致しているが、その後、推定値は応力がほぼ一定（完全塑性）となっているのに対して、計測値は応力の増加（ひずみ硬化）が見られる。また、終局ひずみについては推定値より計測値の方が大きくなっているが、計測値でも 2%のものと 6%のものがありバラツキがみられ、逆解析の特性であるとは断定できない。

6. まとめ

本研究で得られた主な結果をまとめると以下の通りである。

- (1)モーメントー曲率関係から逆解析によって引張応力ーひずみ関係を推定できるこ

とを確認した。

- (2)逆解析法は JCI 法に比べ、特に終局ひずみの推定に有効であることを示した。
- (3)圧縮応力ーひずみ関係は逆解析の結果に影響を及ぼすが、完全塑性型の応力ーひずみ関係を用いれば、実用上はその影響を回避できることを示した。
- (4)実験値に逆解析法を適用した場合、ひずみの小さい領域では推定値は実験値と概ね一致したが、大ひずみ領域では差が見られた。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：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), p.5, 2004.5
- 2) 日本コンクリート工学協会：繊維補強セメント複合材料の曲げモーメントー曲率曲線試験法 (http://www.jci-web.jp/jci_standard/), JCI-S-003-2005