

超高強度繊維補強コンクリート (Ductal) の構造的な性能評価

— 引張特性のモデル化と感度解析 —

福浦尚之・鵜澤哲史^{*1)}・三桶達夫・柄登志彦・加納宏一

Keywords : reactive powder concrete, fiber reinforced concrete, ultra high-strength, high-ductility, tension softening, size effect

反応性微粉末コンクリート, 鋼繊維補強コンクリート, 超高強度, 高靱性, 引張軟化, 寸法効果

1. はじめに

近年、高強度コンクリートを用いた構造物が土木・建築の分野で数多く建設されるようになってきており、構造物の高性能化及びコストダウンへの高強度コンクリートに対する期待が増している。フランスで開発された超高強度繊維補強コンクリート（以下、Ductal と記す）は、反応性微粉末コンクリート (Reactive Powder Concrete) と鋼繊維からなり、超高強度と高靱性の二つの性能をバランス良く有した材料である。Ductal は、圧縮強度 200N/mm² (φ 50mm×100mm 供試体)、曲げ引張強度 42N/mm² (40mm×40mm×160mm 供試体) を有する高性能材料であり、これを長大橋や高層建築物に適用することにより、大きな合理化が図れると考えられる。

Ductal の特徴として、高い引張強度とひび割れ以降の高靱性が上げられる。本研究はこの引張特性を数値モデル化し、この引張特性が部材挙動において大きな寄与をしていることを明らかにするものである。まず、切り欠きを有する試験体 (10cm×10cm×40cm) の曲げ試験結果を逆解析し、Ductal の引張応力—開口変位関係を求め、数値モデル化した。そして、これを基に部材設計において一般的に必要な引張応力—ひずみ関係を導出した。さらに、これらの関係を用いた数値解析と実験との比較により、引張特性のモデル化が部材挙動に与える影響を検討した。

2. 10×10×40cm 曲げ試験体から得られる引張特性

2.1 切り欠きを有する試験体の曲げ試験

材料の引張特性を実験により評価する場合、直接引張試験による方法が最も望ましい。しかし、この方法はひ

び割れ以降の挙動を安定して制御することが難しく、現状においては安定した結果を得るための一般的な方法にはなっていない。内田ら¹⁾は引張軟化特性を評価するために、曲げ試験から得られた荷重—変位曲線を FEM モデルを用いて逆解析し、引張応力—開口変位の関係を多直線で近似する方法を提案している。本研究ではこの手法を用いて Ductal の引張応力—開口変位を求めた。図-1 に 2 ケース各 3 体の合計 6 体の切り欠きを有する曲げ試験体 (10 cm×10 cm×40 cm の直方試験体) に 4 点曲げ載荷して得られた荷重—変位曲線を示す。

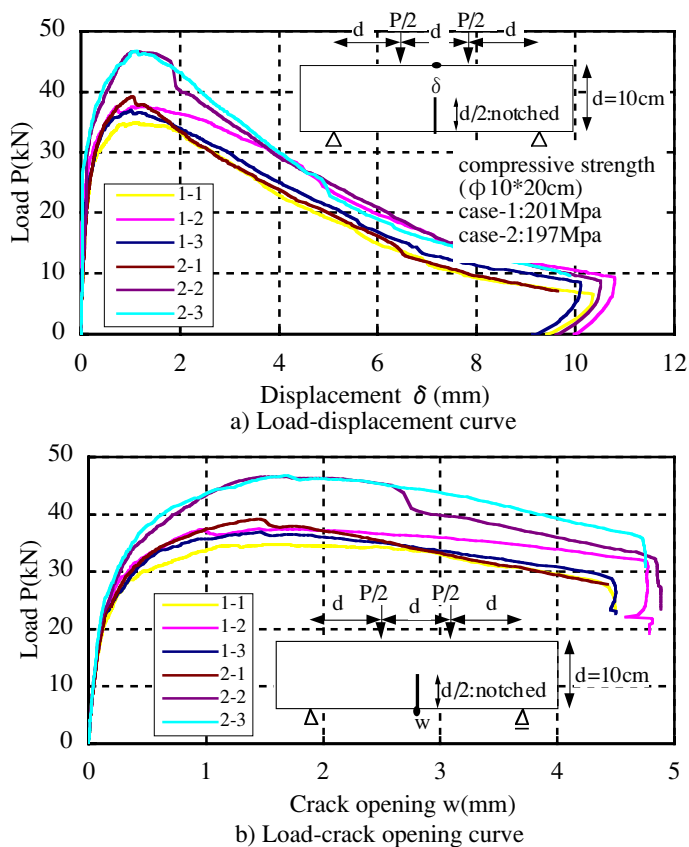


図-1 曲げ試験結果
Results of flexural tests

*1 関西支店 土木部

2.2 引張応力－開口変位関係の逆解析

6 体の曲げ試験結果を基に引張応力－開口変位関係を逆解析する。逆解析の手法は、前述の通り内田らによるものであり、現在 JCI 破壊特性委員会にて試験法及び評価法の標準化が検討されている (<http://c-pc8.civil.musashi-tech.ac.jp/teacher/jci-fm/index.html>)。この手法における入力条件は、試験体の構造形状に関する情報と荷重－変位（撓み又は切り欠き部の開口変位）関係のみであり、これより弾性限界引張応力に対応する初期結合応力とひび割れ以降の引張応力に対応する結合応力と開口変位の関係及びひび割れ前のヤング係数が求められる。

本研究では、図-2 に示すように 2 種類の細/粗分割 FEM モデルを用いて、荷重－切り欠き部開口変位、荷重－撓みを基に逆解析を行った。図-3 に逆解析結果をまとめて示す。

図-3 により示される逆解析から求めた引張挙動の傾向を 3 つの領域に分けて示す。

領域①：ひび割れ発生直後に応力の低下が見られる。

領域②：応力が再度回復し、引張応力を保持する領域が有る。

領域③：引張応力は開口変位の増大に従って、ほぼ線形的に低下していく。

領域①は、ダクトルの鋼繊維が引張力を分担しはじめる迄の軟化域、領域②は鋼繊維により主に引張応力が分担されている状態を示し、領域③は鋼繊維がマトリックスから抜け出し、徐々にの応力分担が減少していく状態にあると考えられる。載荷後の試験体のひび割れ断面を観察すると、鋼繊維の破断は生じておらず、抜け出しが生じている。先に、直接引張試験の安定した実施が困難であることを記したが、引張強度直後に応力が低下する①領域での応力開放を載荷装置が十分に制御できないことが、その要因の 1 つと考えられる。

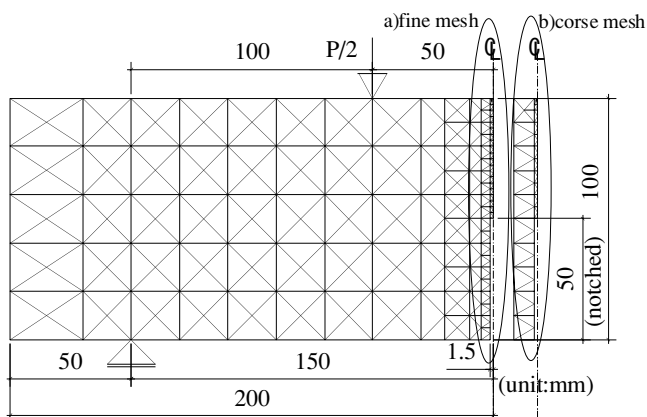
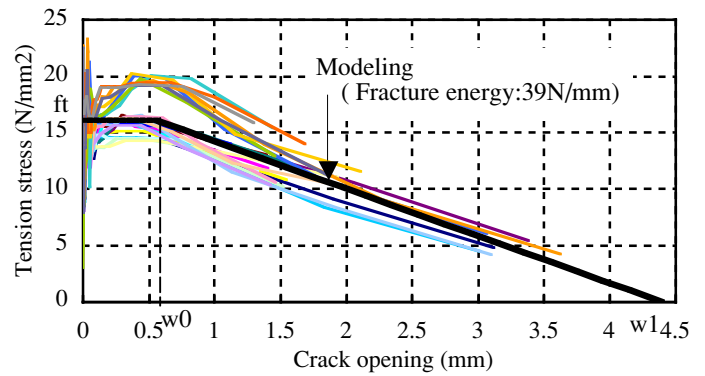
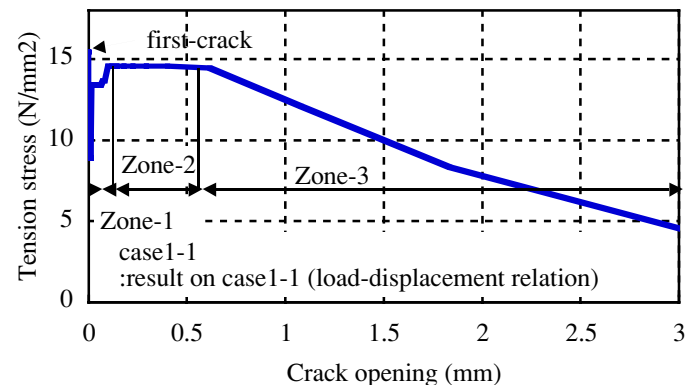


図-2 逆解析用 FEM モデル
Fem model for back-analysis



a) Results of back-analysis



b) Result of back-analysis

図-3 逆解析結果

Results of back-analysis

2.3 引張応力－開口変位関係のモデル化

逆解析から得られた結果を基に、引張応力－開口変位関係を数値モデル化する。引張挙動の特徴は前述のように 3 つの領域に分けられる。本研究では、構造物設計への適用に際しての扱い易さを念頭に置き、図-3a) に示すように、引張強度以後にその値を保持する領域と線形的に応力が低下する領域をもつ単純なモデル化を行った。図-3 より分かるように、開口変位及び撓みに基づく逆解析結果は、引張応力 0 の領域まで求められてはいない。これは、収集した変位データの限界によるものである。特に、切り欠き先端の開口変位に関してはクリップゲージの測定限界が 4mm 程度であることから、精度ある逆解析結果としては 2mm 程度までしか得られていない。しかし、全体的な傾向は線形的な応力低下を示していること、開口幅が大きい領域のモデル化は部材の挙動に与える影響は少ないと考えられることを加味しモデル化を行った。逆解析結果に基づく数値モデル化を表-1 にまとめる。

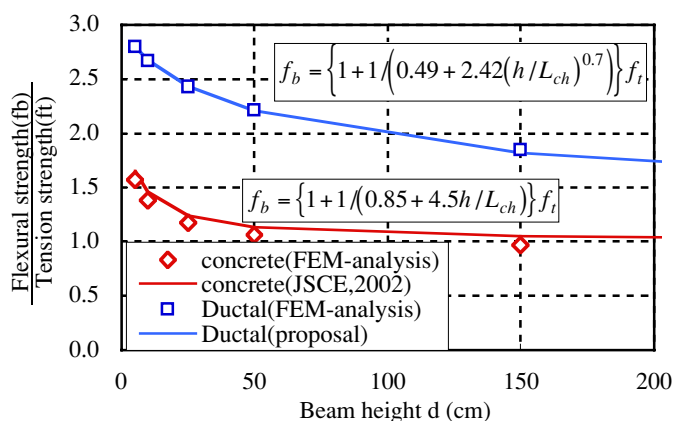
2.4 曲げ引張強度の寸法効果解析

一般コンクリート及びダクトルのようなひび割れの局所化を伴う材料の曲げ強度には寸法効果が有り、部材断面が高くなる程その曲げ強度は引張強度に漸近していく。

表-1 数値モデル化のまとめ

Numerical modeling			
	f_t (N/mm ²)	w_0 (mm)	w_1 (mm)
1-1	14.1	0.7	4
1-2	15.4	0.5	5
1-3	15.1	0.4	4.4
2-1	15.5	0.5	4.2
2-2	17.9	0.6	4
2-3	18.6	0.6	4.5
Average	16.1	0.55	4.4
Standard deviation	1.4	0.1	0.3

この事実は広く受け入れられており、RC示方書にも無筋コンクリートの曲げ強度－引張強度関係式が示されている²⁾。この関係式は、実験結果及び引張応力－開口変位関係に基づくFEM解析によって定められたものである。ダクトルについても同様な曲げ強度の寸法効果をFEM解析によって求め、RC示方書と同形式の曲げ強度－引張強度関係式を定めた結果を図-4に示す。これより、無筋コンクリートとダクトルの曲げ強度の寸法効果を比較すると、ダクトルの方が曲げ強度／引張強度比が常に大きいことがわかる。これは、ダクトルの引張特性が無筋コンクリートに比べて高靱性であることによるものである。

図-4 曲げ強度の寸法効果解析結果
Size effect on flexural strength

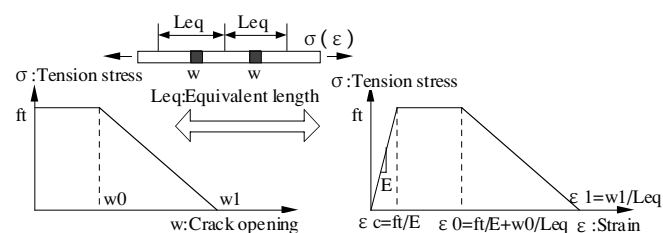
2.5 引張応力－ひずみ関係のモデル化と感度解析

前項においてダクトルの引張特性を引張応力－開口変位関係により定めた。この引張特性を構造設計のための構造解析に適用する場合、以下の2方法が考えられる。

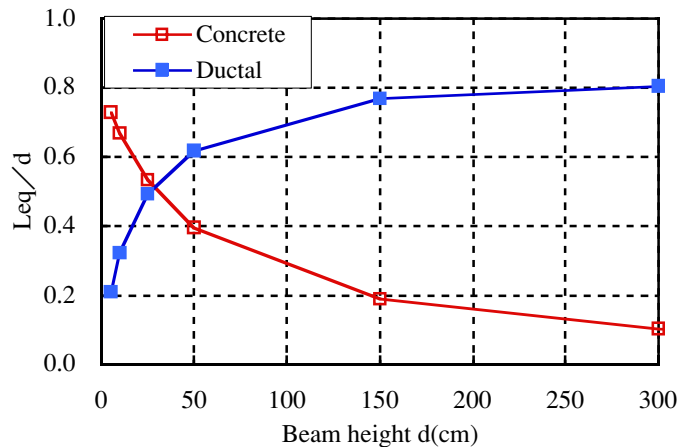
- ①引張応力－開口変位関係を直接使い、FEM解析を行う。
- ②引張応力－ひずみ関係に変換し、断面解析を行う。

コンクリート構造物の設計においては後者が一般的な手法であるが、このようなひび割れの局所化を伴う材料の特性を引張応力－ひずみ関係で表す場合には、等価検長¹⁾を用いて引張応力－開口変位関係より変換するこ

とで適切なモデル化が可能となる。図-4に変換の概念図を示す。

図-5 引張応力－ひずみ関係への換算
Translation to stress-strain relation

等価検長は、図-4に示したFEM解析よりの曲げ強度と引張応力－ひずみ関係から求めた曲げ強度が一致するように反復計算により求めた。図-6に無筋コンクリートの提案式¹⁾と併せて示す。等価検長を定める検討においては、その出発点をFEM解析から求めた曲げ強度／引張強度関係としている。これは、実験によるダクトルの曲げ強度／引張強度関係に関する十分なデータがまだ蓄積されていないためであるが、図-4に示したように無筋コンクリートに関する実験結果とFEM解析結果の適合性が良いことから、十分な妥当性を有すると考える。今後は、実験データを蓄積し、比較検討を行っていく予定である。

図-6 等価検長
Equivalent length

3. ファイバーモデルによる曲げ部材の挙動解析

3.1 引張鋼材のない曲げ部材の解析

引張鋼材のない曲げ載荷実験に関して、ファイバーモデルによる解析シミュレーションを行う。ファイバーモデルとは、骨組み解析における梁要素の剛性・断面力を、細分割した断面の各セルの応力の積分に基づいて求めるものであり、梁の非線形な挙動を反映することのできる解析手法である。図-7に検討モデル及び解析結果

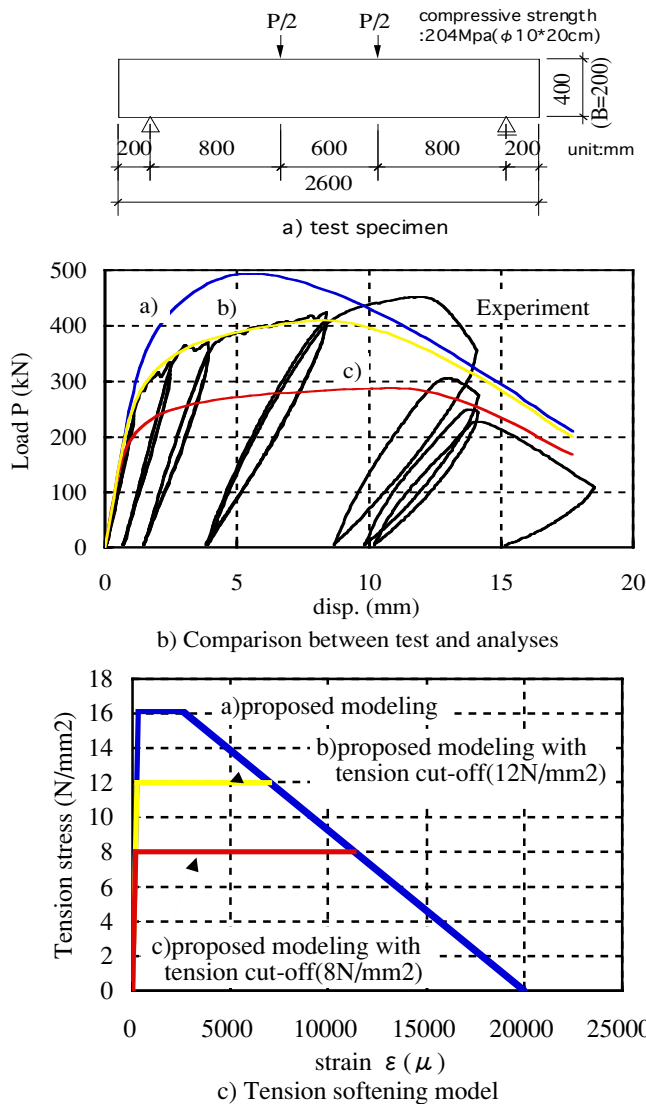


図-7 検証解析 (引張鋼材無のケース)

Verification on flexural test with no longitudinal reinforcing

を示す。

本提案モデルによる解析結果 a)は、実験結果を十分にシミュレートできている。又、引張特性を変化させたケース b)、c)についても併記している。ケース b)は、最大耐力に至る途中までについてはケース a)よりも適合性がよい。本提案モデルは僅か 6 体の試験の逆解析結果に基づいたものであり、今後は多数の試験結果に対して本手法を適用し、モデル精度の向上を図る予定である。

3.2 引張鋼材を有する曲げ部材の解析

引張鋼材を有する曲げ部材の解析シミュレーション結果を図-8 に示す。引張鋼材が有るにも場合にも、ダクトルの引張応力分担は無視出来ないほど大きく、本提案モデル a)は、最大耐力を良好にシミュレート出来ている。図-7 及び図-8 より、ダクトルの引張特性は部材の曲げ挙動に大きく影響を与えており、引張特性を精度よく定めることが、ダクトルの特性を生かした合理的

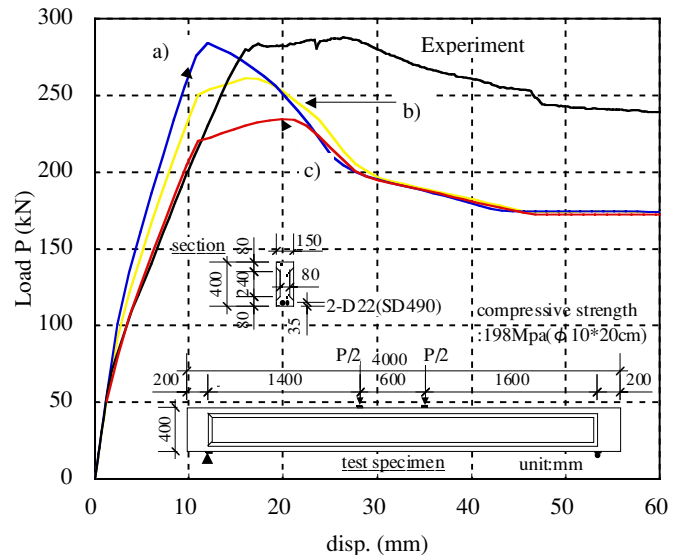


図-8 検証解析 (引張鋼材有のケース)

Verification on flexural test with longitudinal reinforcing

な設計に重要であることが分かる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 切り欠きを有する 10 cm×10 cm×40 cm試験体の曲げ試験結果を基に引張応力-開口変位関係を逆解析し、引張特性を明らかにした。
- 2) 逆解析した引張応力-開口変位関係を数値モデル化し、これを基にダクトルの曲げ強度の寸法効果を明らかにした。但し、解析検討が主となっていることから、実験によりダクトルの曲げ強度の寸法効果を確認していく必要が有る。
- 3) 部材設計において有用となる引張応力-ひずみ関係を、引張応力-開口変位関係に基づいて定めた。
- 4) 引張応力-ひずみ関係を用いたファイバー解析を行い、引張鋼材の有無の両者の曲げ実験結果と比較し、両者の挙動を十分に表現出来ることを示した。又、引張特性に関するパラメーター解析を行い、引張特性のモデル化が、合理的な設計に非常に重要であることを示した。
- 5) 今後は、多数の試験結果に対して本手法を適用し引張特性モデルの精度向上を図ると共に、限界状態設計法の枠組みに適合したダクトルの設計手法の確立を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 内田裕一，六郷恵哲，小柳治：コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討，土木学会論文集，No.442/V-16，1992.2
- 2) 土木学会：2002 年版コンクリート標準示方書，2002.3