超高強度コンクリート (Ductal)の構造性能評価

梁部材の曲げせん断実験および解析

鵜澤哲史・柄登志彦・趙唯堅・福嶋研一・加納宏一

Keywords: reactive powder concrete, fibered reinforced concrete, high-strength, ductility 反応性微粉末,鋼繊維補強,超高強度,高靭性

1. はじめに

近年,100N/mm²を越える高強度コンクリートを用い た高層建築物が数多く建てられるようになってきてお り,高強度そしてその他の性能を有した高性能コンク リートに対する期待が増している.フランスのブイグ 社,ラファージ社,ローディア社の3社によって開発さ れたDuctalは反応性微粉末コンクリート(Reactive Powder Concrete)と鋼繊維(又は有機繊維)からなり, 超高強度と高靭性の二つの性能をバランス良く有した材 料である¹⁾.Ductalを用いて製作された部材の曲げ強 度,せん断強度および破壊エネルギー等の構造性能は従 来のコンクリート部材のそれとは比較にならない程大き な値となり,このDuctalを長大橋や高層建築物に適用し た場合,従来では考えられないような設計が可能とな る.

本研究ではDuctalの構造部材を設計・施工する際に必要となる基本的な情報を収集するため様々な単純梁を製作しその構造性能について評価を行った.具体的には断面寸法,せん断支間-桁高比,引張り鉄筋の有無をパラメーターとした試験体に曲げせん断載荷を行い,曲げ耐力,せん断耐力,靭性そしてひび割れ分布を評価した.

Ductalのように鋼繊維で補強された部材の変形挙動 は,材料の引張り軟化特性に大きく影響されることが知 られている.本研究ではDuctalの引張り軟化特性を明ら かにするため,曲げ強度試験の結果を逆解析して算定し た引張り軟化特性をFEM解析に適用し,この解析結果と 実験結果との比較も行った.

2. 実験概要

2.1 試験体の形状寸法

引張り鉄筋で補強されていない梁の曲げ挙動を把握す

るため,BシリーズおよびSシリーズの2種類の試験体を 製作した.Bシリーズは断面寸法が同じでせん断支間-桁高比が異なる試験体,逆にSシリーズはせん断支間-桁高比が同じで断面寸法の異なる試験体を各々4および3 体製作した.図-1に示すようにBシリーズの断面寸法は 高さ200mm,幅150mmであり,せん断支間-桁高比(a/ h)は2.0から5.0まで変化させた.一方,Sシリーズは図-2に示すようにせん断支間-桁高比(a/h)は2.0とし,桁 高を200mmから600mmそしてせん断支間を400mmから 1200mmに変化させた.

引張り鉄筋で補強された単純梁の曲げおよびせん断挙 動を把握するため,Rシリーズの試験体3体を製作した. Rシリーズの試験体は図-3に示すようにI型の断面形状 とし,ウェブ幅は40mmまたは80mm,外形寸法は高さ 400mm,幅150mmとした.引張り鉄筋は直径22mmの高



Geometry of B series specimens

超高強度コンクリート (Ductal)の構造性能評価



Geometry of S series specimens

強度鉄筋を使用し,被りが24mmとなるように配置した.R1およびR2の試験体は形状寸法が同じであるが,梁のせん断挙動に対する鋼繊維の影響を把握するため,R2の試験体には鋼繊維を混入せず製作した.R3の試験体はせん断-桁高比を4.0,引張り鉄筋比を2.7%とし,曲げ破壊するように設計した.なお,R1およびR2の引張り鉄筋比は8.0%である.

2.2 使用材料および試験体製作

Ductalは前述したようにプレミックス粉体材料(以下,プレミックスと呼ぶ)と鋼繊維から構成されている.このプレミックスはポルトランドセメント,シリカ ヒュームそして珪石微粉末などを細密充填組成になるような粒度構成とした無機質系複合材料である.水セメン ト比はポリカルボン酸系の高性能減水剤を用いることに より22%と極めて小さな値となっている.鋼繊維は直径 0.2mm,長さ15mmであり,練り混ぜの際に2vol.%を混 入する.

梁試験体の型枠への打設は,以下のような2通りの方 法により行った.B1およびB2の二つの試験体に対して は梁型枠の両端から交互に打設し,その他の試験体に対 しては梁型枠の片側から連続的に打設し自己充填させ た.B1およびB2の試験体では両側から打設したことに より両端から流れが梁中央付近で合流する状態となっ た.なお,本研究で打設したDuctalのフロー値は約 240mm,フロータイムは約25秒であった.

養生は常温で48時間の前養生を行った後,90の高温 養生を48時間実施した.養生期間中は試験体の乾燥を防 ぐため,養生槽内に蒸気を発生させ湿潤状態とした.



各試験体に打設したDuctalの強度試験結果を表-1に示 す.表中の圧縮強度および弾性係数は 100mm×200mm の円柱供試体,そして曲げ強度は100mm×100mm× 400mmの角柱供試体を用いて求めた値である.

2.3 載荷方法および計測項目

梁試験体は写真-1に示すように軸方向の移動を自由とした回転支承上に設置し,10MN載荷装置を用いて4点曲 げせん断載荷を実施した.載荷初期は荷重制御で載荷を 行い,ひび割れが進展し剛性低下が顕著となった時,変 位制御に切り替え,終局状態となるまで一方向に単純載 荷した.

計測項目は載荷荷重,梁中央部の変位,そして試験体 表面のひずみであり載荷中の挙動を逐次計測した.

3. 実験結果

3.1 引張り鉄筋で補強されていない梁

3.1.1 Bシリーズ

図-4にBシリーズの各試験体から得られた縁応力度 -変位曲線を示す.ここで,縁応力度は断面の引張り下縁 に生じる曲げ直応力度であり,梁中央部の曲げモーメン ト値を全断面有効とした断面係数で除した値である.こ の図に見られるように縁応力度 - 変位曲線に対するせん 断支間 - 桁高比の影響を明確に見ることができないが, 実験から得られた縁応力度 - 変位曲線は大きく分けて2 種類に分類することができる.1つは高い曲げ強度およ び良好な靭性を示したB3およびB4の結果,そしてもう1 つは曲げ強度が小さい結果となったB1およびB2の結果で ある.

大成建設技術センター報 第35号 (2002)

表-1 各試験体の強度試験結果

Mechanical properties of the specimens

	B 1	B 2	B 3	B 4	S 1	S 2	S 3	R1	R2	R3
Compressive Strength (MPa) 223	211	204	200	227	216	226	185	191	207
Elastic Modulus (GPa)	55.0	56.0	55.7	55.5	56.8	56.6	56.8	52.9	54.7	54.0
Flexural Strength (MPa)	-	36.2	38.8	_	33.9	30.6	26.6	32.3	19.0	32.7



写真-1 載荷装置および載荷状況 Loading equipment

高い曲げ性能を示したB3およびB4は初期のひび割れが 約20N/mm²で発生するまで線形弾性挙動を示した.初期 ひび割れ発生後,剛性は低下して非線形挙動を示すが曲 げ応力度は漸増し,また曲げ破壊するまで良好な靭性を 示した.B3およびB4の最大曲げ強度は各々28N/mm²そし て35N/mm²であったが,この最大曲げ強度の値は前述の 曲げ強度試験結果とほぼ同等の値となっている.一方, 曲げ性能が小さい結果となったB1およびB2では,初期の ひび割れが約16N/mm²で発生した後,B3およびB4の結果 とは異なり,曲げ強度は増加せず,また十分な靭性を示 す前に曲げ破壊に至った.しかしながら,この曲げ強度 の値は従来のコンクリート部材のものと比較して十分大 きな値である.

上記のような2つの挙動の違いは試験体に発生したひ び割れの発生状況により説明することができる.写真-2 に各々のひび割れ状況の例としてB2およびB4の結果を示 す.B1およびB2は少数の曲げひび割れが梁中央付近に集 中して発生したが,B3およびB4は最大耐力に至るまで数 多くのひび割れが試験体に分散して発生し,最大耐力以 降,梁中央付近の一つのひび割れが大きく開口し耐力が 低下した.

B1およびB2の試験体にひび割れが集中して発生した理由として,打設の際に弱部ができたことによるものと推定される.すなわちB1およびB2では型枠の両端から打設を行ったが,梁中央付近の合流部分では鋼繊維が架橋さ







写真-2 曲げ区間のひび割れ分布状況 Crack petterns between load points

れず不連続状態となり、その部分にひび割れが集中して 発生したものと考える.以上のことから打設方法は Ductal部材の構造性能を維持するために大変重要な課題 となると言える.

3.1.2 Sシリーズ

図-5にSシリーズの各試験体から得られた縁応力度 -変位曲線を示す.各試験体ともに初期のひび割れが約 20N/mm²で発生し,最大曲げ応力度(30N/mm²~35N/ mm²)に至るまで良好な靭性を示した.またひび割れ分 布は写真-3に示すように1箇所に集中せず分散して発生し た.Sシリーズの試験では曲げ挙動に対する寸法効果の 有無について検討することを目的としていたが,各試験体の最大曲げ耐力やひび割れ状況は同等であり,本研究で設定した範囲では断面寸法による影響を見ることができなかった.

3.2 引張り鉄筋で補強された梁

図-6にR1およびR2の載荷試験で得られた荷重 - 変位曲 線を示す.R1は荷重が65kNの時,曲げ区間の引張り下 縁部に曲げひび割れが発生し,210kNの時にせん断支間 のウェブに斜めひび割れが発生した.細いひび割れが最 大耐力525kNに至るまで数多く発生したが,写真-4に示 すようにウェブに発生した2つの斜めひび割れが大きく 開口した.最終的に引張り鉄筋が降伏する前にせん断支 間部の上フランジが座屈し急激に耐力が低下した.

一方,R2の試験体では曲げひび割れが発生した後,R1 と比較して剛性が大きく低下した.曲げひび割れ発生後 も耐力は漸増したが,R1と比較してひび割れの本数は少 ない結果となった.荷重が324kNの時,大きな斜めひび 割れが発生し,写真-4に示すように試験体は幾つかのブ ロックに割れて脆性的に破壊した.

これら2つの試験体の最大耐力時のせん断応力度は下 式により算定できる.

$$\tau_{u} = \frac{3P_{u}}{4hb} \tag{1}$$

ここで, P_uは最大荷重, hは桁高そしてbはウェブ幅である.上式に基づいて算定したR1およびR2のせん断応力度は各々25N/mm²そして15N/mm²であった.以上の結果から,鋼繊維を付加することにより明らかにせん断耐力が向上し, かつ脆性的な破壊を防止することができる.

図-7にR3の載荷試験より得られた荷重 - 変位曲線を示 す.荷重が50kNの時に下フランジに曲げひび割れが発生 し,荷重の増加に伴い曲げひび割れが多数発生した.荷 重が284kNに達した時,引張り鉄筋が降伏し梁中央部の 降伏変位は17mmとなった.引張り鉄筋の降伏後,梁中 央部の曲げひび割れが大きく開口し(写真-5参照),そ れに伴いひび割れ部の鋼繊維は抜け出し,耐力が徐々に 低下した.しかしながら,降伏変位の7倍以上の変形を 作用させた時,上フランジの圧縮ひずみは約0.5%となっ たが,試験体は破壊せずに十分な耐力を保持していた.

4. 数値解析

4.1 解析モデル
 前章の実験結果に示したように,一般的にDuctal製梁





写真-3 S2のひび割れ分布状況

Crack petterns of S2







(a) R1



(b) R2

写真-4 R1およびR2のひび割れ分布状況 Crack petterns of R1 and R2



部材に対して曲げせん断載荷した時,1つのひび割れが 大きく開口するまで多数の細いひび割れが分散して発生 し非線形挙動を示す.このような挙動をFEM解析により 再現するためには,マトリックスと鋼繊維からなる混合 体をある非線形特性を有した一様な連続体,すなわち分 散ひび割れモデルとしてモデル化することが合理的であ ると考える.

材料の非線形特性の設定において, Ductalのように鋼 繊維で補強された部材は,無筋コンクリートとは異なり 鋼繊維が引張り力をある程度分担するため、その材料特 有の引張り軟化特性を考慮する必要がある.引張り軟化 特性とは引張り応力度とひび割れ幅の関係を示したもの であり,引張り試験から直接的に評価することが望まし いが,引張り試験は回転の影響を受けず均等に荷重を制 御することが困難なことからあまり実施例がない.内田 ら²⁾は引張り軟化特性を評価するため曲げ試験から得ら れた荷重 - 変位曲線を逆解析し,引張り応力度 - ひび割 れ幅の関係, すなわち引張り軟化特性を多直線で近似す る方法を提案している.本研究ではこの手法を用いて Ductalの引張り軟化特性を評価することとした.図-8に 曲げ強度試験体(100mm×100mm×400mmの角柱試験) 体)に4点曲げ載荷して得られた荷重 - 変位曲線を逆解 析し算定した引張り軟化特性を示す.また,同図に本解 析で設定した引張り軟化特性を併せて示す.

ところで,引張り軟化特性は前述のように引張り応力 度-ひび割れ幅の関係を示したものであり,分散ひび割 れモデルに適用する場合は引張り応力度-ひずみの関係 に変換する必要がある.ひずみに変換する際にひび割れ 幅をある特性長さで除して算定することとなるが,その 特性長さの設定方法は研究者によって異なっており,決 まった方法が無いのが現状である.本研究ではメッシュ 分割を実験で観察された主要なひび割れ間隔以下に設定 し,1つの要素内に多くても1本のひび割れが入るものと 仮定して,特性長さを要素面積の2乗根に設定した.





Tension softening diagram for the analyses

表-3 解析パラメーターの値

Crack width (mm

図-8 引張り軟化曲線

Major parameters for analyses

Parameter for Ductal						
Uniaxial Yield Strength (MPa)	200					
Friction Angle (degree)	9.87					
Dilatancy Angle (degree)	9.87					
Elastic Modulus (GPa)	55.0					
Parameter for Reinforcement Bars						
Uniaxial Yield Strength (MPa)	1100					
Elastic Modulus (GPa)	210					

一方,Ductalの圧縮側の材料特性は,破壊に至るまで ほぼ線形挙動を示すことから完全弾塑性モデルとし,降 伏曲面はDrucker-Pragerを仮定した.

なお,本研究ではFEM解析プログラ-として非線形汎 用プログラムDIANAを用いた.

4.2 解析結果と実験結果の比較

ここでは,解析例として曲げせん断実験で曲げ破壊お よびせん断破壊したS2およびR1を選定し,解析結果と実 験結果の比較を示す.なお,試験体は4節点平面応力要 素,またR1の鉄筋はトラス要素を用いた.主要な解析パ ラメーターを表-3に示す.

図-9に解析および実験で得られた荷重 - 変位曲線の比 較を示す.曲げ破壊したS2の場合,解析結果はひび割れ 発生以降の耐力が漸増している挙動を良く表現している が,最大耐力は実験結果を下回る結果となった.一方, せん断破壊したR1の場合,解析で得られた荷重は同じ変



Distribution of plastic strain at the Maximum Load

位に対して実験結果より若干大きな値となっているが, その差はわずかなものとなっている.

図-10に解析で得られた塑性ひずみの分布を示す.な お,この塑性ひずみ分布はひび割れが発生した場所を示 したものである.S2の解析では,ひび割れが曲げ区間の 下フランジに分散して発生し,最大耐力以降は載荷点位 置にひび割れが局所化した.R1の解析では,曲げひび割 れおよび斜めひび割れが発生し,最大耐力時では実験結 果と同様に斜めひび割れが開口する結果となった.

以上の解析結果と実験結果の比較から,解析は実験結 果を良く模擬しており,ここで示した引張り軟化特性お よびモデル化手法を用いてDuctal製梁部材の曲げ挙動お よびせん断挙動を評価することができると言える.

5. まとめ

本研究では超高強度および高靭性の性能を併せもつ Ductalにより様々な梁を製作し,曲げせん実験を実施し た.実験結果から得られた知見を以下にまとめる.

1) 引張り鉄筋の補強のない梁では,曲げひび割れ発生 後もひび割れが分散して発生するのに伴い,耐力の増加 および十分な靭性が見られ,高い曲げ性能を示した.初 期の曲げひび割れは縁応力度が約20N/mm²の時に発生し ており,また終局時の縁応力度は30N/mm²~35N/mm²と なった.

2) 引張り鉄筋で補強された梁では, せん断補強筋が無いのにも関わらず斜めひび割れ発生後も脆性的な挙動は

見られなかった.本研究で実験したせん断支間-桁高比 が2.0の梁では終局時せん断応力度は25N/mm²となった. 3)引張り鉄筋で補強され,曲げ破壊した梁では,上フ ランジの圧縮ひずみが0.5%以上となっても十分な耐力が 保持されていた.

4) Ductal製部材の高い構造性能を保持するためには打設 方法が重要な問題となる.繊維の配向および不足による 弱部を作らないようにするためには連続的に打設し、繊 維の方向がランダムになるように考慮する必要がある.

上記の実験以外に,FEM解析を実施し,実験結果との 比較を行った.本研究では曲げ強度試験結果を逆解析し てDuctalの引張り軟化特性を評価した.この引張り軟化 特性を分布ひび割れモデルに適用して非線形FEM解析を 実施し,Ductal製梁部材の曲げ破壊およびせん断破壊を ほぼ模擬できることを示した.

参考文献

- Orange, G., Acker. P., and Vernet, C. : A new generation of UHP concrete : DUCTAL damage registance and micromechanical analysis, 3rd International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composite, RILEM, pp. 102-112, 1999.
- 2)栗原哲彦,安藤貴宏,国枝稔,内田裕市,六郷恵哲:
 多直線近似法による引張り軟化曲線の推定と短繊維 補強コンクリートの曲げ破壊性状,土木学会論文 集,No.532,V-30,pp.119-129,1996.2