

## 委員会報告 「コンクリートの破壊特性の試験方法に関する 調査研究委員会報告」

橘高 義典\*1・内田 裕市\*2・金子 佳生\*3・閑田 徹志\*4・福山 洋\*5・中村 成春\*6

### 【委員構成】

委員長	橘高 義典	東京都立大学
幹事	内田 裕一	岐阜大学
	金子 佳生	東北大学
委員	秋田 宏	東北工業大学
	石黒 覚	三重大学
	石原誠一郎	(株)浅沼組技術研究所
	大塚 浩司	東北学院大学
	大岡 督尚	東急建設(株)
	閑田 徹志	鹿島建設(株)技術研究所
	栗原 哲彦	武蔵工業大学
	興石 直幸	早稲田大学
	佐藤 幸博	(株)フジタ技術センター
	篠原 保二	東京工業大学
	白井 伸明	日本大学
	中村 成春	宇都宮大学
	福山 洋	独立行政法人建築研究所
	長谷川俊昭	清水建設(株)技術研究所
	松尾 真紀	東京工業大学
	松尾 庄二	鉄建建設(株)
	松本 高志	東京大学
	三橋 博三	東北大学
	六郷 恵哲	岐阜大学
	国枝 稔	岐阜大学 ('00.4~)
通信委員	大津 政康	熊本大学
	堀井 秀之	東京大学
	村上 聖	熊本大学

### 1. はじめに

近年、多くのコンクリート構造物でひび割れに伴う劣化・損傷が社会問題となり、ひび割れ対策への関心が高まっている。このような状況の中で、コンクリートのひび割れに起因する破壊現象をわかりやすく解釈し、合理的なモデル化ならびに定量評価を行うために「破壊力学」が有望視されている。コンクリートの破壊力学パラメータの一つに引張軟化特性があるが、その試験方法に関し標準化されたものはない。1998年に岐阜で開催された「FRAMCOS-3, コンクリートの軟化特性の定量評価に関する国際ワークショップ」では、引張軟化特性の試験方法の必要性が確認され、RILEM 内にも検討委員会が発足予定(2001年)となり、我が国においてもコンクリートの各種破壊特性の試験方法の確立が求められるようになってきた。本委員会は、これらを背景に、コンクリートの破壊特性の評価パラメータとして注目されている引張軟化特性に関し、標準試験方法の必要性・有用性の検討、現状の評価方法の調査、繊維補強への適用、混合モードでの評価、共通試験・共通解析による問題点・妥当性の確認等を行い、これらを踏まえて破壊特性の標準試験方法を立案することを目的とした。具体的には以下の3つのWGにより検討を行った。

WG1「破壊エネルギー試験および引張軟化曲線推定法の検討」(主査:内田)

WG2「繊維補強コンクリートの引張軟化特性の評価および繊維補強RC部材の数値解析」

\*1 東京都立大学大学院工学研究科 教授 工博 (正会員)

\*2 岐阜大学工学部土木学科 助教授 工博 (正会員)

\*3 東北大学大学院工学研究科 助教授 Ph.D. (正会員)

\*4 鹿島建設技術研究所 主任研究員 Ph.D. (正会員)

\*5 建築研究所構造研究グループ 上席研究員 工博 (正会員)

\*6 宇都宮大学工学部建設学科 助手 工博 (正会員)

(主査：橋高，SWG主査：閑田，福山)  
 WG3「混合モード試験方法および数値解析の検討」(主査：金子)  
 また、本委員会では、提案する試験方法や解析手法の有効性と問題点を明らかにするために、委員会の委員以外の方々にも広く参加を呼びかけ、共通試験および共通解析を実施した。

## 2. プレーンコンクリートの破壊エネルギーおよび引張軟化曲線の試験法案

### 2.1 破壊エネルギー試験法(案)

コンクリートの破壊エネルギーを求めるためには、供試体が完全に破断するまでに要するエネルギー(荷重-載荷点変位曲線下の面積で与えられる)を正確に計測すればよい。本委員会では、特に試験の簡便性を重視し、図-2.1に示す通り、基本的にRILEMの切欠きはりの3点曲げ試験による破壊エネルギー試験提案案(以下、RILEM法と略す)に準じた方法を提案することとした。RILEM法に対する変更点は以下の通りである。

#### ①供試体寸法

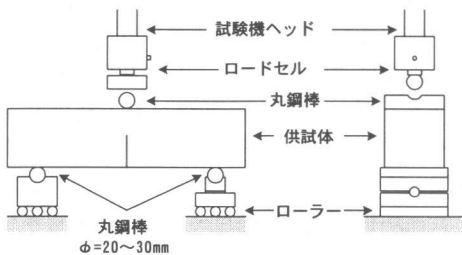


図-2.1 切欠きはりの3点曲げ試験

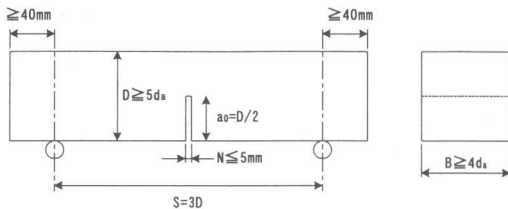


図-2.2 供試体の寸法

供試体の寸法は大きい方が試験結果のばらつきが小さくなり好ましいと考えられるが、ここでは、特に実用性を重視して、RILEM法より小さくすることとした。図-2.2に供試体寸法を示す。これによって、粗骨材の最大寸法( $d_a$ )が20mm以下の場合には、曲げ強度試験用供試体として広く用いられている100×100×400mm曲げ供試体が使用できるものとした。

#### ②変形計測

破壊エネルギーを求めるためには、荷重と載荷点変位を計測する必要がある。しかし、今回は計測の精度ならびに簡便性を考慮して、載荷点変位の代わりに切欠きの肩口開口変位(CMOD)をクリップゲージで計測することとし、破壊エネルギーは荷重-CMOD曲線から次式により求めることとした。なお、式中の定数0.75がCMODと載荷点変位の換算係数である。

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (2.1)$$

$$W_1 = 0.75 \left( \frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_c \quad (2.2)$$

ここで、 $G_F$ : 破壊エネルギー (N/mm),  
 $W_0$ : 供試体が破断するまでの荷重-CMOD曲線下の面積 (N・mm),  
 $W_1$ : 供試体の自重および載荷治具がなす仕事 (N・mm),  
 $A_{lig}$ : リガメントの面積 (mm<sup>2</sup>),  
 $m_1$ : 供試体の質量 (kg),  
 $S$ : 載荷スパン (mm),  
 $L$ : 供試体の全長 (mm),  
 $m_2$ : 試験機に取付けられておらず、破断するまで供試体に載っている治具の質量 (kg),  
 $g$ : 重力加速度 (9.807m/s<sup>2</sup>),  
 $CMOD_c$ : 破断時のひび割れ開口変位 (mm)

### 2.2 引張軟化曲線の評価方法(案)

引張軟化曲線の推定法としては、これまでに幾つかの方法が提案されているが、本委員会ではこれらの中で最も精度が高いと考えられている橋高らが提案した多直線近似解析法を採用す

ることとした。多直線近似解析法は、仮想ひび割れモデルを用いたひび割れ進展解析において、ひび割れを進展させるごとに、引張軟化曲線の先端部を仮定して荷重-変位曲線を求め、これと試験で得られた荷重-変位曲線が一致するように引張軟化曲線の先端部を順次決定するものである。多直線近似解析法は、数値解法であるため、これを標準化するためにはプログラムを標準化する必要がある。そこで、今回は解析プログラムをインターネット上に公開した。

### 2.3 破壊エネルギーおよび引張軟化曲線の評価方法(案)に関する共通試験

試験法を提案するにあたり、破壊エネルギーおよび引張軟化曲線の評価方法の原案をインタ

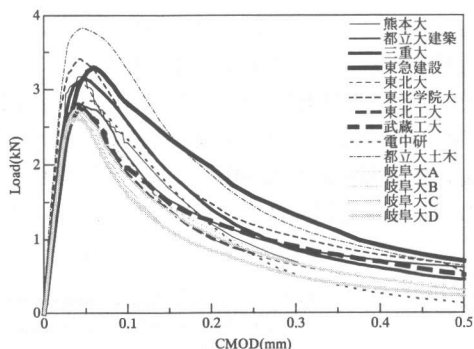


図-2.3 荷重-CMOD 曲線

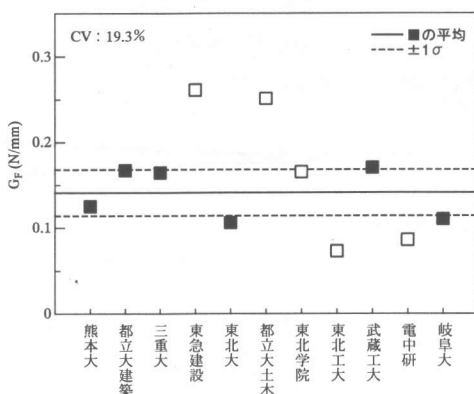


図-2.4 破壊エネルギー

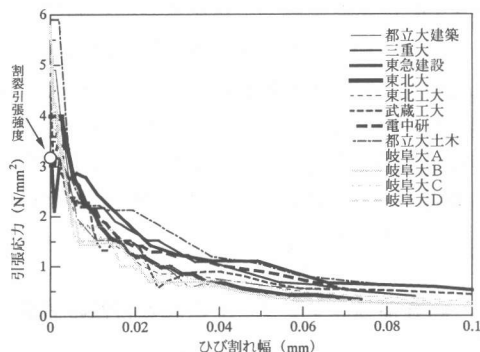


図-2.5 引張軟化曲線

ーネット上に公開し、共通試験を実施した。この共通試験では、同一のコンクリートを用いて製作された供試体を用い、全国 11ヶ所の研究機関で破壊エネルギー試験が行なわれた。参加研究機関は以下の通りである。

熊本大学、(財)電力中央研究所、東急建設(株)、東京都立大学建築、東北大学、東京都立大学土木、東北学院大学、東北工業大学、三重大、武蔵工業大学、岐阜大学

各研究機関で計測された 4本の荷重-CMOD 曲線を平均化したものを図-2.3 に示す。荷重-CMOD 曲線の初期勾配は一部の研究機関で大きくなっているが、その他の研究機関でほとんど差は見られない。このことにより、供試体のたわみではなく、クリップゲージにより CMOD を計測することで精度の高い荷重-変形関係が計測できることが確認できた。

図-2.4 に各研究機関の破壊エネルギーの平均値と変動係数を示す。なお、破断点変位が計測されていない、あるいは著しい差がみられた研究機関のデータは平均値と変動係数の計算に含めていない。その結果、破壊エネルギーの平均値は  $0.141 \text{ N/mm}^2$ 、変動係数 19.3% となり、各研究機関内でのばらつき(コンクリート自体のばらつき)と同程度となった。これより、計測上の問題がない限り、提案した試験法は標準

試験法として特に問題はないと判断した。

図-2.5 に各研究機関で求められた引張軟化曲線を示す。引張軟化曲線の概形は解析に用いられた荷重-CMOD 曲線の差をほぼそのまま反映したかたちで、ばらついた結果となった。しかし、公開されたプログラムを用いて引張軟化曲線を求めること自体には基本的に問題ないことが確認された。

### 3. 繊維補強コンクリートの破壊特性の評価方法

繊維補強コンクリート (Fiber Reinforced Concrete, 以下 FRC) の破壊特性を評価する種々の破壊力学的パラメータは架橋則が元となっている。架橋則とは、ひび割れ間で伝達される応力とひび割れ開口幅との関係であり、ひび割れの開口に伴い伝達される応力が減少する時は引張軟化則 (Tension Softening Diagram, 以下 TSD) と呼ばれる。架橋則は、ひび割れ間において応力を伝達する媒体に依存し(図-3.1)、プレーンコンクリートの場合には、骨材、セメントペースト、そしてこれらの界面の相対

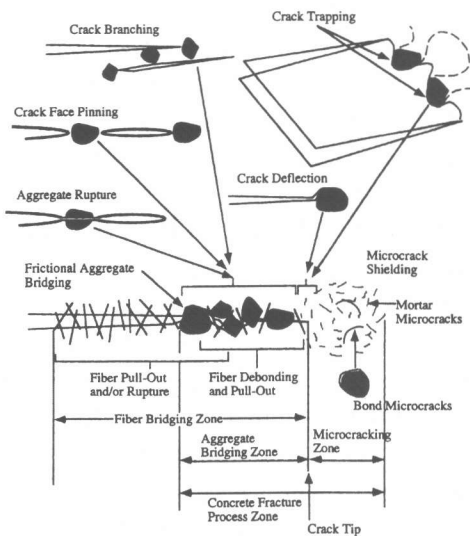


図-3.1 FRC の靱性向上に関連する要因

的な強度の関係により、骨材の抜け出しもしくは破断の際に応力がひび割れ間で伝達されるのに対して、繊維補強コンクリートの場合には、コンクリート中に分散配向された繊維がやはり抜け出しもしくは破断に際して応力伝達の役割を担う。プレーンコンクリートでは骨材により伝達される応力は比較的早期に減少し、伝達応力が消失する限界ひび割れ開口幅は 1mm にも満たないが、繊維補強コンクリートでは、数 mm から数十 mm の長さの繊維が応力を伝達し、限界ひび割れ開口幅は半繊維長の大きさになり得る。

FRC の引張軟化則は、コンクリートの場合と同様に、図-3.2 に示すような微細ひび割れ累積領域先端(図-3.1 では Microcracking Zone の先端)に始まるひび割れを想定する仮想ひび割れモデルを用い、はりの曲げ試験によって推定することが可能である。しかし、これまで ACI や RILEM 等から提案されている標準的な試験方法は、ひび割れの進展による荷重-変位曲線関係の評価が困難である等の理由により、引張軟化則の推定にそのまま用いること

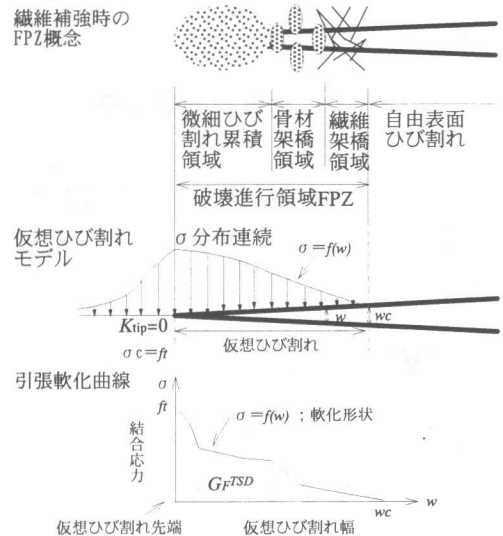


図-3.2 破壊進行領域の力学モデル化と引張軟化曲線

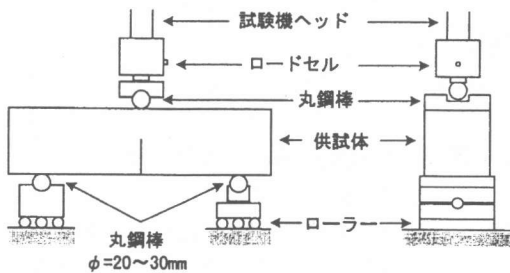


図-3.3 標準試験概要

は必ずしも適切でない。

そこで、ここでは FRC の引張軟化則の推定に供するため、図-3.3 に示すような  $10 \times 10 \times 40\text{cm}$  の切欠きはりを用いた 3 点曲げによる標準試験方法を提案した。試験では、荷重-切欠き肩口開口変位 (CMOD) 曲線、あるいは荷重-荷重点変位 (LPD) 曲線を計測することによって、FRC の破壊特性 (タフネス) を評価するとともに、引張軟化曲線の推定解析用データを得るものである。プレーンコンクリートにおいては、LPD 計測の規定はないが、FRC においては CMOD をクリップゲージで計測できなくなるまで試験する場合も考えられるため、荷重点変位 (LPD) の計測についても規定した。

引張軟化則の推定方法としては、FRC の適用目的に対応して使い分けることを想定して、推定精度の低い順からレベル 1~レベル 3 の階層評価方法を定めた。レベル 1 および 2 は経験式による簡便な推定方法について規定し、レベル 3 では逆解析により精度の高い推定を実現する。

しかしながら、他の破壊パラメータと異なり、引張軟化則の標準的な試験方法が定まっていない現状を鑑み、試験方法の精度、普遍性、客観性などについて検討し、評価方法の問題点および妥当性を広く確認することが必要である。そこで、本委員会が立案した標準試験方法を用いて複数の機関で試験を行い、その結果について共通の場で検討することとした。共通試験は、

全国の 15 研究機関で実施され、計測された FRC の荷重-CMOD 曲線の結果に基づき、a) 初期ひび割れ発生応力、b) 最大荷重時の応力、c) CMOD が 2mm 時のタフネス、および d) CMOD が 4mm におけるタフネスなどの評価パラメータについて検討した。

共通試験結果は、荷重-CMOD 曲線が未計測の 1 研究機関を除いて、14 研究機関中の 3 研究機関で、供試体 3 本間の挙動のバラツキが目立った。しかしながら、これらのバラツキが目立った研究機関も含めた 14 研究機関による各評価パラメータの変動係数平均値は、a) が 6.0%、b) が 12.9%、c) が 15.6%、d) が 16.0% となった。従って、繊維補強としてのバラツキを考慮したとしても、計測上の問題がない限り、標準試験法として精度の問題は少ないと考えられる。

また、共通試験で得られた各試験機関の荷重-CMOD 曲線結果を利用して、引張軟化則を推定し検討した。引張軟化則は、解析に利用した荷重-CMOD 曲線の挙動が反映された結果が得られ、一部の荷重-CMOD 曲線実測結果が異なる研究機関を除いて、ほぼ同様の形状が得られた。

以上より、繊維補強コンクリートについて、切欠きはりの 3 点曲げ試験による荷重-CMOD 曲線の測定、CMOD が 2mm および 4mm の時のタフネス評価ならびに引張軟化曲線の推定に関して、標準試験方法として提案しても問題ないことが確認されたと言える。

#### 4. 繊維補強鉄筋コンクリート部材の数値解析への破壊特性評価の応用

##### 4.1 現状

繊維補強コンクリート (FRC) を用いた部材の数値解析へ破壊特性評価を応用した例は、シアキーのせん断破壊モデル構築へ応用した例などがあるものの、柱や梁といった FRC 部材あるいは構造物全体に対する数値解析への応用は、トンネル覆工の設計<sup>1)</sup>、および柱部材の設計<sup>2)</sup>に

反映されているが、極めて少ない。

トンネル覆工の設計に関しては、文献1)の中で、「鋼繊維補強コンクリートの引張側の耐力算定には、伝達応力度－開口変位の適切な関係を想定して用いるものとする」明記されている。ただし、設計の便宜上、ひび割れ面で鋼繊維が受け持つ引張強度は、開口変位に対し一様に分布するものとして耐力算定を行えるよう工夫している。また、鋼繊維の受け持つ引張強度は15cm角供試体による曲げ試験結果から求めることを原則としており、さらに、部材寸法の影響を考慮し、曲げ試験結果から実際の設計に用いる鋼繊維が受け持つ引張強度の算出方法についても解説されている。

一方、柱部材の設計においては、文献2)のせん断力に対する安全性の検討において、十分な信頼性の確認を前提とした上で、「FEM等の数値解析によってせん断耐力を算定しても良い」と

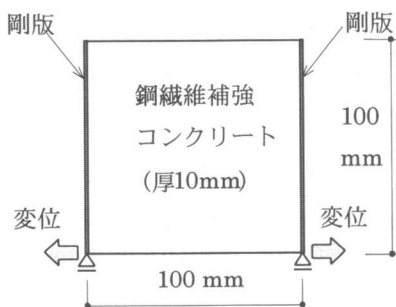


図-4.1 ひび割れ解析モデル

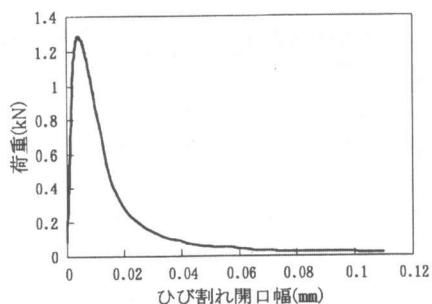


図-4.2 荷重－ひび割れ開口幅曲線

している。ただし、FRC部材のせん断耐力には、引張軟化特性が大きく寄与することを指摘し、「数値解析を行う際には引張軟化特性を適切に考慮すること」としている。また、付属資料にFEM解析へ引張軟化曲線を採り入れる手法を示し、そこでは、図-4.1に示すモデルによる検証解析を行い、その結果が図-4.2に示す荷重－ひび割れ開口幅曲線とほぼ一致することを確認しておくよう推奨している。

上記二例は、いずれも材料の引張軟化曲線を何らかの形で解析手法に採り入れ、設計へ反映させたものであり、このような考え方は、従来の鉄筋コンクリート部材解析の延長上にあるものである。これは、通常の繊維補強セメント材料は、軟化の程度こそ緩やかになるものの、コンクリートと同様ひび割れ発生以降に強度が低下するという共通点によるものと言える。

FRCの破壊特性のうち明示的に考慮されているのは現状では引張軟化特性のみであり、FRCとして構造性能に影響を及ぼすことが予想される、a)複合応力下での破壊特性、b)せん断ひび割れ界面でのせん断剛性低下特性、c)ひび割れコンクリートの圧縮強度低下特性、d)鉄筋との付着特性などの今後の研究が必要である。

#### 4.2 設計法への応用

FRCの利用は、従来のRC構造物に対してより高い性能や新たな種類の価値を付与できる可能性を有しており、これが社会の要求と合致すれば性能設計における有用な一つの技術となる。そのためには、性能設計における要求性能の充足を如何に評価するかが大切であり、すなわち構成材料の特性（破壊力学パラメータ）からどのようにして構造要素や構造システムの性能を評価するかが求められる。

破壊特性試験には材料の破壊力学的な観点からの個性を調査する目的と、構造部材の挙動を再現するための数値解析の構成則を調査する目的の2面性があり、前者は構造設計で仮定する材料特性を実現するための材料設計法へ、後者

は構造部材の性能の調査やその結果を用いた技術開発または構造設計へ利用される。有限要素法解析などの解析手法は、構造設計に用いられる設計式や条件等を導くため、もしくは技術開発においてさまざまな因子の構造への影響度を確認し最適な構造方法を探求するためなどには、確認された適用範囲内であれば極めて有用なツールである。FRCの普及のためには、このような構造実験や解析の資料を蓄積し、なるべく簡便で一般性のある設計手法を確立していく必要がある。ただし、現状での数値解析への一般的な適用のためには、力と変形（開口変位など）の関係を平均応力と平均ひずみの関係に置き換える必要があり、将来的には解析手法や構成則が発展し、設計に直接利用されることが望まれる。

FRCは、コンクリートとは異なり引張軟化曲線などの破壊特性をコントロールできるものである。よって、その有効利用のためには、材料特性と構造性能の関係を明確にし、何をどのようにコントロールすべきかを明らかにしていく必要がある。今後、この分野の研究や評価技術が発展し、FRCが社会の要求を充足するための一技術として確立することを期待したい。

#### 4.3 繊維補強コンクリート部材の共通試験

委員会報告書では、繊維の有無およびせん断補強筋の有無を因子とした、4体の梁の曲げせん断実験を実施し、その概要と結果ならびに解析結果の例を紹介している。この実験では、せん断補強筋の有無によりせん断強度が異なるせん断破壊型のRC部材に対して、繊維の混入による引張軟化特性の改善がどの程度構造性能に影響を及ぼすかを検討し、引張軟化特性の影響は多大であることを鉄筋のひずみの推移などから明らかにしている。さらに、その数値解析の例を示し、繊維を混入した場合の効果を現状の解析技術でも定性的には説明できることを示している。ただし、繊維混入による効果は引張軟化特性の改善の他に、4.1に示した特性a)~d)なども

影響を及ぼしていると考えられるが、それらに対する資料は現状ではほとんど無いことから、解析精度の向上のためにはこれらも含めた試験方法の開発と破壊特性構成則の開発・向上が望まれる。

このように、破壊特性試験や構成則は繊維補強コンクリート部材の性能評価に欠かせず、それらに関する今後の研究は、社会からのさまざまな要求を充足する技術の進歩の一つとして位置付けられる。

#### 5. 混合モード破壊に関する調査研究

コンクリートのモードI型ひび割れ破壊に関しては、すでに多くの実験のおよび解析的研究が行われており、この破壊モード挙動を数式記述する破壊力学モデル（例えば、仮想ひび割れモデルやひび割れ帯モデル）は確立している。また、材料物性と見なせる破壊力学パラメータ（破壊エネルギーや引張軟化特性）も実験的に抽出することが可能となってきている。一方、コンクリート構造物に生じる実際の破壊モードは、構造形式や荷重および境界条件など様々な条件によって変化し、複雑な様相を呈することが知られている。こうした現実の問題に対処するためには、モードI以外のせん断型モードII破壊やこれらが複合した混合モード破壊に関する現象の物理的解釈やその挙動を記述する数式モデルの確立、さらにはモデルを定量的に表現するのに必要な力学パラメータを標準化された試験法により抽出することが不可欠である。

本調査研究では、材料レベルにおいて活発に研究されているモードI破壊現象に関する見識を、混合モード破壊まで拡張し、その破壊現象に関する物理的解釈と数理モデルを鉄筋コンクリート構造物や部材の破壊現象に応用することにより、構造物全体の挙動をマクロ的に把握する力学体系を構築することを最終目標として、その第一段階として材料構成則レベルと構造体レベルの2つの混合モード破壊局面を視野に入れ、混合モード破壊の定義、混合モード破壊

現象を再現するための数値解析上の問題点の抽出、混合モード標準試験法の可能性と問題点、及び今後の研究のための客感的指標として JCI ベンチマーク実験の提案を試みた。それらの成果を以下に要約する。

### 5.1 混合モード破壊について

コンクリートの混合モードとして、1 軸圧縮応力を受けるコンクリートの場合、骨材寸法のメゾレベルでは、微細ひび割れ進行領域において混合モード変位の存在が認められることから、モード II 型のせん断破壊だけでなく、圧縮破壊をも拡張して含めることとして既往の研究について検討した。ここでは、まず、(1)従来からのせん断強度試験方法について紹介し、その後、(2)モード II 型破壊の代表と考えられるコンクリート打継ぎ部でのせん断挙動、(3)コンクリートのせん断破壊性状あるいはひび割れ面でのせん断挙動、および(4)コンクリートの圧縮破壊性状、に焦点を絞って既往の研究を概観した。また、これらの既往の研究をベースにして混合モード破壊のメカニズムについて概説した。

### 5.2 共通試験

複合応力を受けるコンクリート系材料の混合モード破壊挙動はひび割れの発生を起点とした極めて複雑な非線形現象であり、モード I 破壊試験により抽出した破壊パラメータを用いた力学モデルのみでどこまで評価することが可能かを明らかにする必要がある。過去においてコンクリートの混合モード破壊に関する種々の試験法が提案されているが、設計や解析に有用なパラメータを直接的に評価できるものとして受け入れられている標準的な試験法は存在しない。これは複数あるいは未確認の破壊モードが混在し、またこれらが相互に影響し合うため、破壊挙動を特徴づけるパラメータを実験的に抽出するのが困難であることが一因であると考えられる。一方、こうした問題を解決する手段として解析的手法は有効であり、混合モード破壊を再

現するのに必要な力学パラメータを抽出し、その妥当性を評価することが可能と考えられる。

本共通試験では混合モード破壊と考えられる種々のせん断破壊実験を実施し、標準試験法で評価しようとしている引張軟化特性をベースにした数値解析を行い、せん断破壊現象を特徴づけるひび割れ挙動や荷重—変形挙動などを再現できるかどうかを検証した。課題項目としては、プレーンコンクリート・鉄筋コンクリートのせん断実験とそれに関する数値解析のいずれか、または両方を実施するものとした。なお、せん断実験として、「課題 3-1：切欠きを有するプレーンコンクリート試験体のせん断実験」、 「課題 3-2：コンクリート打継ぎ面のせん断付着実験」、 「課題 3-3：水平ノッチ付きコンクリート試験体の一面せん断実験」、 「課題 3-4：RC ディープビームのせん断実験」の 4 つの試験および類似の試験体を対象とした。また、これらのせん断実験や解析に加えて、混合モード破壊と考えられる実験や解析もオプションとして加えた。せん断実験および数値解析は課題種別を選定し、実施要領に基づいて行いその結果を報告して頂いた。

今回の共通試験では、実験が応募数 8 件、うち 3 件辞退があり最終的に 5 件（課題 3-4 が 2 件、他各課題 1 件）、解析が応募数 12 件、うち 3 件辞退があり最終的に 9 件（課題 3-1 と 3-2 が各 2 件、課題 3-3 が 1 件、課題 3-4 が 4 件）と、問題の難度から若干少ない参加数であった。特に、実験に関しては特殊な施設の必要性からかなり限られた参加数となった。こうした高度な企画にもかかわらず、難解な問題に取り組んで頂いた参加者の方々に感謝の意を表するとともに、今回の企画がこの分野の発展に大きく寄与することを期待する次第である。

### 5.3 混合モード標準試験法

標準試験は、大きく分けて 2 つの目的のうちいずれかを持つべきものとする。すなわちその試験結果が直接、設計式や評価基準値とし



て使用される場合と、その試験結果が数値解析の構成則パラメータのように間接的に設計に用いられる場合である。本研究委員会で行った共通試験からもわかるように、混合モード試験の場合、試験目的に応じてその試験方法が全く異なってくる。またコンクリートの破壊強度は、応力の組合せによって変化するため、構造物の設計を目的とする工学の分野からは、個々の組合せ応力状態に対応した破壊メカニズムの解明が要求される。したがって標準試験方法とする場合には、試験目的を明確にし、その適用範囲を限定する必要がある。この観点より、本研究委員会で行った課題3-1から3-4の共通実験を各試験目的別に分類し、標準試験法としての問題点と適用性等の項目について整理した。

#### 5.4 ベンチマーク実験

本研究委員会で行った混合モード共通試験課題が標準試験法として定着していくためには、広範囲に実験結果を比較検討していく必要がある。それ故、安定した試験結果が得られた実験条件等より判断して、各課題の中から選択した実験を「JCI 混合モード破壊ベンチマーク実験」とし、今後の研究のための客観的指標とした。

#### 5.5 まとめ

本研究委員会では、せん断破壊、圧縮破壊とは何かといった基本概念に立ち返り、我々が観察する破壊現象に関わるパラメータの物理的解釈を巨視的、微視的に行うための基礎データを収集した。混合モードにおける破壊エネルギーの物理的解釈とその定量化やモデル化、各種構成則の重み付け、設計法に応じた信頼性の高い標準試験法の構築など、本調査研究で取り上げたテーマは、非常に難解な問題であり、本研究委員会においても十分に議論してきたとはいえない。そのため、本調査研究をベースにした新たな調査・研究領域の拡張と今後の研究の進展を期待したい。

## 6. JCI 標準試験方法案

本委員会で検討し作成した、コンクリートの破壊特性に関する標準試験方法案は以下の3つである。内容の詳細は、本委員会のホームページ（<http://c-pc8.civil.musashi-tech.ac.jp/teacher/jci-fm/index.html>）を参照頂きたい。

- 1) プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験方法(案)・同解説
- 2) 繊維補強コンクリートの切欠きはり試験体の荷重変位曲線の計測方法およびタフネスの評価方法(案)・同解説
- 3) コンクリートの引張軟化曲線の評価方法(案)・同解説

1), 2)は、本報告書2章、3章に具体的に述べられた試験方法である。

3)は、任意の切欠きはり試験体の荷重変位曲線から、引張軟化曲線を多直線近似法で求めることを規定したもので、インターネット等を利用し解析を行うことを前提としたユニークな標準試験方法案となっている。本文を以下に抜粋する。

### コンクリートの引張軟化曲線の評価方法(案)

#### 1. 適用範囲

本評価法は、切欠き試験体を用いたモード I の安定破壊試験で得られた荷重変位曲線のデータを用い、多直線近似解析法により引張軟化曲線を推定するものである。本評価方法で求められる引張軟化曲線は、コンクリートのモード I による破壊を仮想ひび割れモデルでモデル化し解析する場合に用いられる、開口変位と結合応力の関係を表した曲線である。

#### 2. 多直線近似解析の概要

多直線近似解析法とは、実験より得られた荷重変位曲線を基に逆解析により引張軟化曲線を推定する方法である。この方法は、仮想ひび割れモデルを用いたひび割れ進展解析において、

ひび割れを進展させるごとに、引張軟化曲線の先端の勾配を仮定して荷重変位関係を計算し、これと実験結果が合致するように引張軟化曲線を順次決定するものである。

### 3. ヤング係数の推定

多直線近似解析法で用いるコンクリートのヤング係数は、実験結果より得られた荷重変位曲線の最大荷重の 1/3 の荷重点における割線剛性と線形弾性体を仮定した剛性の計算値より求める。

### 4. 初期結合応力

多直線近似解析法で用いる初期結合応力は、実験結果より得られた荷重変位曲線の初期勾配より決定する。初期のひび割れ進展に対して一定の結合応力を仮定し、ひび割れ進展解析を行い、解析で得られる荷重変位関係が実験の荷重変位関係と一致する結合応力を求め、初期結合応力とする。

### 5. 荷重変位曲線の計算

多直線近似解析法より推定された引張軟化曲線を用いて荷重変位曲線を計算することとする。

### 6. 解析プログラム

多直線近似解析ならびに推定された引張軟化曲線を用いて荷重変位曲線の計算を行なうにあたっては、信頼性の確認された解析プログラムによるものとする。

注) 現在公開されているプログラム例には、以下がある。

(1) 引張軟化曲線多直線近似解析ダウンロード用プログラム (作成者: 内田裕市)

<http://c-pc8.civil.musashi-tech.ac.jp/teacher/jci-fm/index.html>

(2) 引張軟化曲線多直線近似解析ウェブサイト用プログラム (作成者: 橘高義典)

<http://www.ecomp.metro-u.ac.jp/~kitsu/fmpana-j.html>

## 7. まとめ

コンクリートの破壊特性に関する標準試験方法を検討し、プレーンコンクリート及び繊維補強コンクリートのモード I の試験方法案、引張軟化曲線の評価方法案を提案した。また、繊維補強コンクリートの破壊パラメータの数値解析への応用について検討した。さらに、混合モード破壊について、数値解析法、試験方法などについて検討した。本報告書の内容が、関連分野の発展に役立てれば幸いである。また、共通試験および共通解析に参加いただいた方々には厚くお礼を申し上げる。

## 参考文献

- 1) 併進工法設計施工研究委員会編：併進工法設計施工法（都市トンネル編），1992
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），1999.11