

## 委員会報告

# 「コンクリート構造への破壊力学の応用」

破壊力学の応用研究委員会

委員長 三橋博三 (東北大学工学部)

### 1. はじめに

コンクリート構造物の大規模化や、コンクリートの高強度化、あるいは有限要素法等による、鉄筋コンクリート構造物の数値解析手法の発展を背景に、コンクリートのひびわれ挙動をより合理的に把握する事が求められている。この為に、破壊力学的手法の研究が近年急速に進み、例えば、CEBのModel Code 90[1]では破壊力学的パラメータの定式化がなされるなど、鉄筋コンクリート構造物の設計や安全性評価への適用が示唆されている。

JCIでは、1988年から2年間にわたってコンクリートの破壊力学研究委員会が設けられ、コンクリートの破壊力学に関する研究の現状についてまとめると共に、1990年3月にはコロキウムを開催した[2,3]。その後も、この分野の研究は急速に発展を続けている。

1991年度よりスタートした新しい委員会は、上記2年間の活動で収集・整理された成果を基礎に、その中で更なる研究の必要性が明らかとされた「コンクリート構造への破壊力学の応用」に関して、検討する事を目的とするものである。具体的には以下の4つのテーマがとり上げられた。

- (1)材料の性能評価への破壊力学の応用
- (2)破壊力学の応用のための数値解析
- (3)構造設計への破壊力学の応用
- (4)強度と破壊性状への寸法効果

また、コンクリート構造の耐荷力やひびわれ伸展に関する各種の解析手法やモデルの有効性と問題点を明かにする為に、委員会の委員以外の方々にも幅広く参加を呼びかけ、後述の4つの問題について共通解析及び実験を実施した。

以上の成果を委員会報告書にまとめると共に、来る10月8日にセミナーを開催して参加者に紹介すると共に、意見の交換を行う予定である。また、来る10月31日～11月2日には、コンクリート構造の寸法効果に関する国際ワークショップを開催し、諸外国の専門家を招いて議論を重ね、寸法効果のメカニズムの解明と寸法効果を考慮したより合理的な設計手法の開発を目指す事となった。その為に、当初予定された2年間の活動期間に加えて、1994年3月まで更に1年の活動が認められた。

この委員会の構成は以下の通りである。

委員長 三橋博三

幹事 白井伸明、野口 博、六郷恵哲、堀井秀之('93.4～幹事)

委員 五十嵐心一、内田裕市、遠藤孝夫、大内 一('91.4～'92.3通信委員)、大津政康、大塚浩司、金子佳生、橘高義典('92.7～'93.7海外通信委員)、近藤吾郎、塩屋俊幸、白石一郎、二羽淳一郎('92.4～)、野村希晶、長谷川俊昭、畑中重光、平田俊夫('93.3～)、前川宏一('91.4～'92.3海外通信委員)、松原義雄('91.4～'93.2)、丸山久一、宮本文穂、村上 聖、吉川弘道('92.4～'93.3海外通信委員)

通信委員 秋田 宏、石黒 覚、伊良波繁雄、寺村敏史、根井 浩、藤井 栄

本稿では、当委員会ですとまとめる報告書の概要を紹介するが、詳細は来る10月8日のセミナーに於

いて報告する。

## 2. 材料の性能評価への破壊力学の応用

破壊力学とは、ひびわれの発生、成長によって引き起こされる破壊現象を対象とした力学で、ひびわれ先端における応力やひずみの特異性を考慮し、その破壊現象を支配している破壊力学パラメータを見いだすことが重要となる。

コンクリートの分野では、1961年にKaplan[4]がコンクリートの破壊靱性値を報告して以来、その破壊靱性値に関する数多くの研究が行われてきたが、コンクリートという疑似脆性的な材料に対する「破壊力学」の適用性は不明の状態が続いた。1970年代の半ばになって、Hillerborg等[5]が、ひびわれの伸展を伴うコンクリートの破壊現象の数値解析に利用できるよう、ひびわれ先端での非線形挙動開始から新たなひびわれ面が完全に形成されるまでの遷移状態、即ち破壊進行領域を表わす仮想ひびわれ(fictitious crack)モデルを提案し、その構成則であるひびわれ面間伝達応力とひびわれ幅との関係、即ち引張軟化曲線とその曲線下の面積として破壊エネルギー $G_F$ を提案した。その後、破壊エネルギー試験推奨法[5]を提案したRILEM(国際材料構造試験研究機関連合)の活動を始めとして、コンクリートの破壊現象の数値解析への適用を中心とした研究が急速に進展した。この「コンクリートの破壊力学」は、破壊現象をエネルギー的平衡問題としてとらえる点では、Griffith理論に始まるいわゆる「破壊力学」の概念を踏襲しているが、既存の切欠き先端からのひびわれ伝播による不安定破壊のみを対象とするのではなく、より広い意味での破壊現象を対象とする言葉として用いられている。そして、コンクリートの引張破壊だけでなくせん断破壊や圧縮破壊、RC部材の各種破壊の軟化現象や強度の寸法依存性の解明あるいはそれらを考慮したより合理的な設計方法の開発へとその応用が期待されている。

そこで報告書では、コンクリートの破壊力学パラメータとしてこれまでに考えられてきたものについて概説し、それらのパラメータがコンクリート工学の諸問題へどのように応用され得るのかを、幾つかの例を挙げて示した。この中には、従来既に経験則に基づいて扱われてきた問題に対し破壊力学パラメータを応用する事によって、その経験則により合理的な解釈あるいは意味を与える試みを示したもの、並びにコンクリート構造物のプレキャスト化あるいは高強度コンクリートや繊維補強コンクリートなど、新しいコンクリート材料の開発に破壊力学を応用する試みを示したものなどが含まれている。

近年の解析技術の発展に伴うひびわれ挙動の数値解析で用いられるひびわれ伸展と破壊進行領域の構成則を精度良く表わし得る一般則についてのコンセンサスは未だ得られていない。そこで、本報告書では幾つかの考え方に基づいてその推定方法を解説した。例えば、既往の実験結果から得られた仮想ひびわれモデルの一般的な引張軟化曲線は、(1)式で表わされる[7]が、

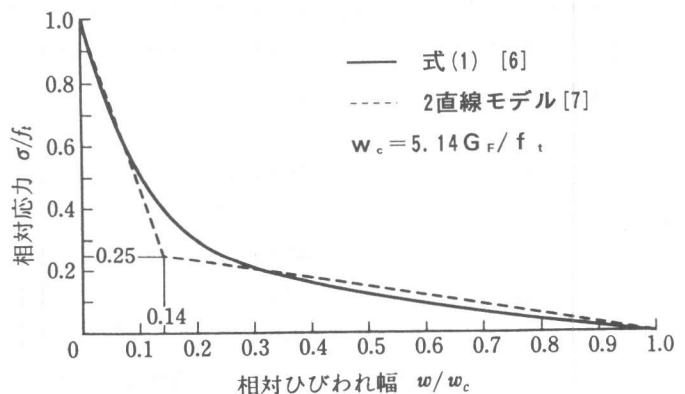


図-1 無次元化引張軟化曲線と2直線モデル

これはより簡易な2直線モデル[8]とも整合している(図1)。

$$\frac{\sigma}{f_t} = \left[ 1 + \left( c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] \exp \left( -c_2 \frac{w}{w_c} \right) - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad (1)$$

ここに、 $c_1=3$ 、 $c_2=6.93$ 、 $\sigma$ はひびわれ面間伝達応力、 $w$ はひびわれ幅、 $f_t$ は引張強度(軟化開始応力)、 $w_c$ は限界ひびわれ幅である。

このような、引張軟化特性は鉄筋コンクリートに観察される様々な非線形現象に影響を及ぼしている。例えば引張応力を受ける鉄筋コンクリート部材に見られるテンションスティフニング効果を引き起こす原因の1つを構成している。また、鉄筋の定着破壊領域で消費されるエネルギーは、図1の曲線下の面積即ち破壊エネルギーとの強い相関性を有する事から、定着鉄筋の応力-引抜き変形のモデル化ができれば、終局の定着強度や変形量を算定できる事が示唆された。更に、同様の機構を逆に用いる事によって、既存のコンクリートの破壊力学特性をアンカーボルトの引き抜きによって推定する事も可能と考えられるが、そのような幾つかの試みも紹介されている。更に、近年広く用いられているひびわれ補修材料や新旧コンクリートの打継ぎ部の性能評価として、従来の最大強度評価のみならず、靱性能の評価も重要であるという観点から、種々の補修材料や接着剤を用いたコンクリートの破壊エネルギー特性についても論説している。

また、近年の建設現場に於ける労務不足を解消する為の効率的な構法の一つとして、セグメント構造物が挙げられるが、接合部のシェアキのせん断破壊に対しては、荷重-変位特性の理論的モデル化は未だ提案されていない。そこで、破壊力学的な立場から破壊機構をモデル化すると共に、プレキャストコンクリート構造物の設計にたいする破壊力学の位置づけが考察された。

一方、新しい材料の開発に際して、その材料の構成要素の検討や、性能評価にも破壊力学は有効である。例えば、高強度コンクリートは、圧縮強度の増大に比して、引張強度の伸びは少ないが、種々の骨材が分担し得る破壊エネルギーの検討を行う事によって、より靱性の高い高強度コンクリートが作れる事も示唆されている。更に、繊維補強コンクリート(FRC)に於いては、繊維の引抜け抵抗や架橋効果により、ひびわれ発生後もより大きなエネルギーの吸収が可能となるが、非線形領域でのひびわれ抵抗性能を部材設計にも生かす為には、その挙動の合理的なモデルによる性能の定量化が必要となる。その為用いられる有効なパラメータの一つが、ひびわれ面の結合応力とひびわれ幅との関係、即ち引張軟化曲線である。この引張軟化曲線が評価されれば、FRC部材の荷重-変形曲線の関係は計算により求められる。一方、FRCの耐荷力の増大は最大結合強度の上昇により可能にされる事、ダクティリティを上げる為には、限界ひびわれ幅の増大や軟化曲線の初期下り勾配を緩くする事が必要であるという事も分かった。その結果、従来より経験的に知られていた幾つかの事柄がどのような機構で起っているのか等が理解され、またより性能の高いFRC材料設計への方向性が示唆された。更に、建築外装用サイディング材の性能評価に用いられている幾つかの試験値と破壊エネルギーとの関係、及びソイルセメント等の乾燥収縮ひびわれと引張軟化特性との関係などが論じられた。

### 3. 破壊力学の応用のための数値解析とモデル化

引張やせん断応力の作用によるコンクリートの破壊現象における特徴的な点は、破壊の起る部分がある領域に局所的に集中し、この破壊領域が軟化挙動を示すところにある。例えば既往のFE

Mモデルは、この軟化挙動を伴う破壊領域の局所化現象を適切にモデル化する事ができず、要素寸法に依存する解析結果を与える欠点がある。それに対して、破壊力学は有効な解析モデルを提供し得ることが知られている。しかしながら、実際のコンクリート構造の非線形挙動を数値解析によりシミュレートしようとする、様々な問題に遭遇する。報告書では、こういった問題の中でも特にモデル化と解析手法について解説すると共に、数値解析の今後の方向について述べている。

まず、ひびわれ領域に於ける破壊進行過程の挙動をどの様にモデル化するかが重要な課題となる。この様な問題に対する破壊力学モデルとしては、大別すると離散ひびわれモデルと分布ひびわれモデルの2種類が提案されている。前者のモデルでは、軟化開始条件を満足した要素間の節点にひびわれ幅の関数として与えられる結合力(即ち、前述の引張軟化曲線で規定される構成則)が作用していると考えられるものである。報告書では引張力とせん断力が複合して作用する混合モード型破壊の解析例なども示されている。一方、後者の分布ひびわれモデルでは、ひびわれを材料特性の変化としてモデル化する事で、ひびわれ発生後もコンクリートは連続体として扱われる。ひびわれ発生前は等方性材料としてモデル化されたコンクリートは、ひびわれ発生後直交異方性材料としてモデル化される。その際、ひびわれ発生後のせん断特性の扱い方によって、固定ひびわれモデルと回転ひびわれモデルに分けられる。とりわけ混合モード型の破壊に対しては、固定ひびわれモデルでは不十分で、ひびわれ発生後ひびわれ方向を最大主ひずみ方向に一致させるように回転させることで、常に主軸が一致するようにした回転ひびわれモデルを用いる事が必要となる[9]。しかし回転ひびわれモデルに対しても、物理現象との対応等から解決すべき問題も幾つか指摘されている。

純引張や純曲げ応力状態にあるコンクリートの破壊挙動については比較的多くの研究例が報告されているが、通常多くのコンクリート構造が置かれている複合応力状態の引張軟化特性については未だ不明な点が多い。数少ない研究結果によれば、圧縮-引張の2軸応力状態にある場合の引張軟化則は、側圧レベルの上昇と共に、限界ひびわれ幅の増大が見られるが、この側圧の影響は最大骨材粒径によっても異なる事が示されている[10]。報告書では、このような研究例を紹介すると共に、複合応力下でのコンクリートの挙動をマイクロプレーンモデルなど、マイクロメカニクスに基づいてモデル化するアプローチも紹介されている。

更に、報告書では、繰返し荷重下での引張破壊現象と引張軟化則のモデル化やテンションソフトニング特性を考慮したテンションハードニング特性等についても最近の研究例が紹介されている。また、従来のコンクリートの破壊力学に関する研究の多くは、引張あるいは曲げ破壊に限定されてきたが、圧縮破壊に対しても破壊進展機構あるいは破壊進展過程で見られる軟化特性という共通の視点からそれを力学的に取扱おうとする立場に立ち、圧縮破壊現象の数値解析やマイクロメカニクスモデルについての最近の研究動向を紹介している。

コンクリートの破壊力学に関連した最近の数値解析に関する話題としては、この他にも、分布ひびわれモデルに対して物理的現象との整合性をより高めた非局所(non-local)モデルに関する研究動向についても述べられている。

一方、コンクリート材料は軟化挙動を示す疑似脆性材料である為に、コンクリート構造が荷重の作用を受けると、分岐やスナップバックなどの不安定な挙動を示す場合のあることが実験的に確認されている。コンクリート構造への破壊力学の応用のためには、こうした複雑な不安定挙動を精度良くシミュレートする為の求解法が必要となる場合がある。表1は、修正ニュートン・ラプソン法に各種の制御法を組み合わせた際の不安定挙動に対する解析能力を比較したものである

が、報告書には表中で最も高い有効性が示されている弧長法のアルゴリズムやその適用例等も紹介されている。また、その他にも軟化挙動を示す材料の解析に特有な幾つかの数値現象やストレスロッキングの問題及びその回避法等についても紹介されている。

表-1 不安定挙動に対する制御法の適用性

制御法	全体不安定		局部不安定	
	軟化	スナップバック	軟化	スナップバック
荷重法	×	×	×	×
変位法	△	×	△	×
弧長法	○	○	○	○

○：有効， △：適用可能な場合もある， ×：不適当

#### 4. 共通解析及び実験

前述のように、コンクリート構造における工学的に重要な力学的問題の中にはひびわれの進展に支配されるものが多くみられるが、その様な問題を解析し、現象を予測・再現する為には、ひびわれの伸展を考慮した解析手法の確立が不可欠である。その基礎となる解析モデルは種々提案されているが、解析対象や解析モデルの選択、更には解析モデルの妥当性の評価並びに現象の解釈は個人レベルで行われているのが現状である。従って、共通の問題について複数の機関で実験あるいは解析を行い、それらの結果を共通の場で論ずることは極めて意義のある事と考え、委員会の委員以外の方にも幅広く参加を呼びかけて「共通解析及び実験」を実施した。その具体的な目的は次の通りである。

- (1) ひびわれの発生・伸展並びに荷重-変形挙動を予測できるか否かを確認し、各種の解析手法の特徴、有効性及び問題点を明らかにする。
- (2) 終局耐荷力を予測する可能性を検討する。特に、終局の破壊メカニズムに及ぼす影響因子を明らかにすると共に、そのモデル化の可能性についても検討する。
- (3) 終局耐力に対する寸法効果は、例えば、ひびわれの伸展、形成された終局構造の応力及び変形状態、あるいは終局破壊時の材料の挙動等のどれに起因するのかを明らかにする。

コンクリートに関する解析モデルは、今日までに種々提案されている。しかし、これらすべての解析モデルに関する有効性、適用範囲、問題点等は共通の基準に基づいて明らかにされているわけではなく、解析コードの開発者が独自の判断で解析モデルを選択しているのが現状と思われる。本共通解析及び実験の目的の一つは、各種の解析モデルの特徴や問題点を明らかにすることであるが、その他に各種のパラメータの影響について検討する事も重要と考えた。従って、各種の影響因子を考慮した「パラメトリック解析」の結果について報告して頂くことを参加者をお願いした。尚、有限要素解析を行う場合には、次のようなものが検討すべき影響因子として挙げられた。

- (a) 引張軟化モデルの形状の影響(例えば、二直線モデル、曲線モデル)
- (b) モードIIのせん断軟化あるいは骨材のかみ合い効果の影響
- (c) 分布ひびわれモデルにおける「ひびわれの回転」による影響(回転ひびわれモデル)
- (d) 離散ひびわれモデルで仮定するひびわれ伸展経路の影響
- (e) 要素数(要素寸法)の影響
- (f) 要素分割法の影響(特に、分布ひびわれモデルの場合、破壊モードが要素分割法に依存する傾向がある。)
- (g) ひびわれコンクリートの圧縮劣化特性の影響

上記の目的を達成する為、以下に示す4種類の問題を呈示し、実験のみあるいはある特定の問題に関する解析の参加も可とする事とした。

[問題1] 無筋コンクリートはりの曲げ破壊の実験及び解析

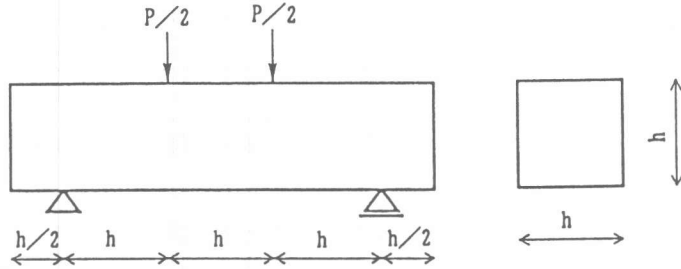


図-1 無筋コンクリートはりの曲げ破壊

[問題2] アンカーボルトの引抜き破壊の実験及び解析

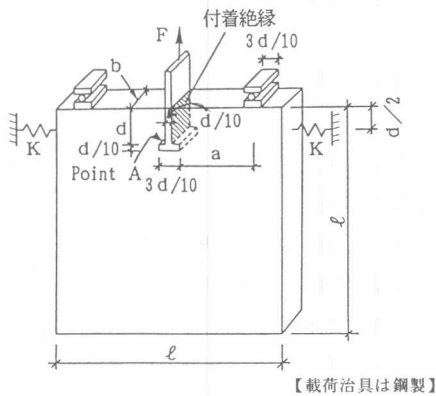
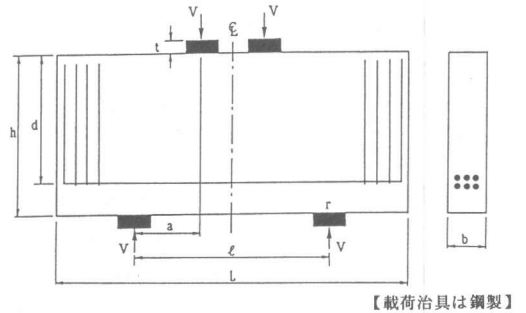


図-2 アンカーボルトの引抜き破壊

[問題3] ディープビームの破壊の解析



ここに、a:せん断スパン、l:スパン、L:全長、  
b:はりの幅、d:有効高さ、r:支圧板の長さ、  
t:支圧板の厚さ

図-3 ディープビームの破壊

[問題4] せん断補強筋が無いRCはりのせん断破壊の解析

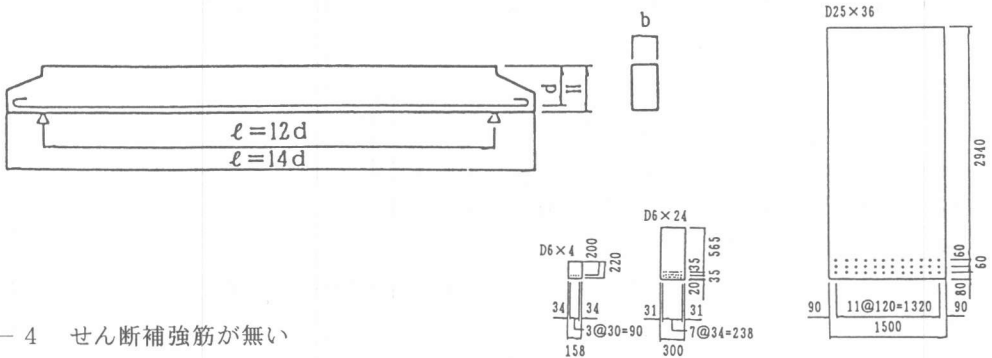


図-4 せん断補強筋が無い  
RCはりのせん断破壊

問題1は最も基本的な問題であり、解析モデルのパラメトリックスタディなどが期待された。問題2はRILEMのTC90-FMAが各国の研究者等に呼びかけて行われたアンカーボルト引抜き共通解析と類似の問題である。問題3、4はより実際の構造部材に近い複雑な問題であると同時に、寸法を何段階かに変えて、寸法効果を解析的に予測する事もねらいとしている。

1993年3月に提出された、第1次報告書から算出された参加件数は、以下の通りである。

[問題1] 実験-12件、解析-23件；[問題2] 実験-5件、解析-12件；[問題3] 解析-7件；  
[問題4] 解析-9件

各参加者からの最終報告書は6月末までに提出される事になっており、来る10月のセミナーの席上で結果の報告及び討論が予定されている。

## 5. コンクリート構造の強度と破壊性状の寸法効果

近年、鉄筋コンクリート構造物は材料の進歩、設計・施工技術の向上と社会的要請等が相まって次第に大型化する傾向にある。それに伴い、実験でその安全性を確かめ得る範囲をはるかに超えた構造物が数多く建設されつつある。従って、そのような大規模あるいは高強度コンクリート構造物を実物大実験なしに可能にする設計手法の確立、あるいはその安全性を、より合理的に確かめる手法の開発が求められている。

コンクリート構造物あるいは部材の挙動を実験的に調べる為に、古くから縮尺模型が用いられてきたが、その縮尺模型による実験結果と実物の挙動との間に様々な食違が生ずる場合が観られる。中でも、コンクリートの曲げ強度、せん断強度、引張強度、圧縮強度等は部材寸法の増加に伴い一般に低下することが知られている。しかも、骨材粒径や水セメント比によっても低下の割合は異なる。また、せん断補強筋を用いていない鉄筋コンクリートばかりでは、曲げ破壊強度についてはさ程でもないのに、せん断破壊強度では、この部材寸法やはりせいの違いによる影響は無視できない程に現われる。このように、模型の寸法の差によって生ずる値の違いを一般に寸法効果と呼び、古くから重要な問題の一つとして注目され、その原因についても種々論じられているが、その低減傾向が荷重形式や部材形状によって異なるメカニズムについては必ずしも未だ明解に説明されてはいない。近年になって、コンクリートの破壊力学に関する研究の中でこの問題が大きくとり上げられるようになり、寸法効果の原因の解明や予測モデルの提案などがなされる一方、土木学会「コンクリート標準示方書」[11]やCEB-FIP Model Code 1990[1]等でも寸法効果を考慮した設計式が取り入れられている。

報告書では上記のような背景を踏まえて、コンクリート構造の各種強度の寸法効果について取りまとめ、寸法効果発生メカニズム及び寸法効果を説明するためのモデルについて述べている。

尚、寸法効果に関しては、本研究委員会の1993年度の活動の中心テーマであり、更に来る10月31日～11月2日に国際ワークショップを開催し、諸外国の研究者を交えての討論を予定している。従って、紙面の都合上、より詳しい報告は別の機会に譲ることとする。

## 6. コンクリート構造の設計への破壊力学の応用

コンクリート構造の設計に、破壊力学を応用する方向としては、FEMに代表されるような数値解析手法の中にひびわれ伸展のクライテリオンとして、あるいは破壊進行領域の構成則として破壊力学パラメータを用いる方法がまずあげられる。一方、例えば寸法効果を取り入れた強度の算定式を破壊力学に基づく種々の検討により求める方向も提案されている。報告書では、これら双方

の方向をにらみながら、最近の研究動向等をまとめている。

従来の設計方法では、作用する荷重や構造物を、各種の仮定のもとに、適切に単純化し、例えば全体を平面骨組などのモデルに置き換えて設計していた。しかし、複雑な形状をした構造物や新型構造物では、簡単なモデル化には困難さを伴う場合が多くなってきている。また、重要な構造物では、単純化の根拠、裏付けを要求される場合も多い。一方、このような問題の実物大実験が非常に困難であることから、FEMの必要性が増加してきていると考えられる。そして、FEMを実施する際には、前提条件として、少なくとも多軸応力化でのコンクリートの構成モデル、破壊のクライテリオン、さらには破壊特性値などが情報として必要となるはずである。これらは、最先端の研究成果である必要は必ずしもないが、一部の設計基準を除いて、このようなFEMを念頭においた材料モデルが与えられた設計基準は存在していないと思われる。

最近刊行されたCEB-FIP Model Code 1990[1]では、従来から慣用的に行われてきた設計方法と並行して、非線形FEM解析の適用を考慮した材料特性値や解析方法が示されている。具体的には、コンクリートの破壊エネルギー、引張軟化曲線、多軸応力下での応力-ひずみモデル、破壊のクライテリオン、曲げ強度の寸法効果などが、材料モデルとして与えられている。即ち、設計者が慣用的な方法とFEMによる方法を選択できるよう配慮されている。設計基準に、このような標準的な数値解析上の材料モデルを規定しておくことにより、設計にFEMを適用することの裏付けが与えられる。わが国においても、設計基準の中に、標準的な材料モデルを提示していくことが急務であると考えられる。

一方、破壊力学モデルを組み込んだ数値解析結果をもとに、寸法効果を含んだ強度の算定式を導くことも、破壊力学の有効な応用の一つと考えられる。中でも、せん断補強されていない棒部材のせん断耐力(斜め引張破壊耐力)は、本質的に無筋コンクリートの破壊(ひびわれ)に支配される現象であり、従って破壊力学の格好の適用分野である。コンクリートの破壊力学の研究の進展に伴い、コンクリートの破壊特性値をパラメトリックに変化させた解析が可能となってきているので、破壊力学特性を組み込んだ数値解析を広汎に行うことにより、力学的に裏付けのある耐力算定式が得られる可能性がある[12]。特に、この際に問題となる、せん断強度の寸法効果については、実験上の制約もあって、超大型の実験の実施が非常に困難であるので、破壊力学特性を組み込んだ数値解析に期待される場所は極めて大きいと言える。この種のせん断強度算定式としては、Bazantの寸法効果則に基づく式[13]やHillerborgの仮想ひびわれモデルを用いた数値解析結果に基づく式[14]が提案されている。特に後者は、土木学会コンクリート標準示方書設計編[11]で、井畔等の大型鉄筋コンクリートはりのせん断試験結果に基づいて決められたせん断耐力算定式とよく対応している点が注目される。せん断耐力の場合と同様のことは、アンカーボルトの耐力算定式にも言える。そこで、アンカーボルトの耐荷機構や埋め込み深さと反力間距離の影響などについて解説すると共に、種々の破壊力学的検討例やそれらに基づく耐力評価の提案式についても紹介している。

更に、報告書ではプレーンコンクリートのせん断破壊について、既往の研究を概説すると共に、セグメント構造物におけるシェアキージョイントの破壊モデルとせん断強度設計式について示している。

また、衝撃荷重によるコンクリート構造の破壊は、静的荷重の場合とそその変形挙動や破壊形式が異なり、より脆性的になる事が知られている。このような破壊に対する安全性照査をエネルギー基準によって行う手法の提案とケーススタディが紹介されている。



大型構造物の代表的なものに、コンクリートダムがあげられる。コンクリートダムへの破壊力学の適用は、与えられた条件でダムに生ずるひびわれのシミュレーションを行い、ひびわれの経路や進展の予測を行う事により、ひびわれの安定性を明かにする目的で、あるいはひびわれの補修法の有効性を予測する目的の為にに行われてきた。報告書では、これら既往の研究について、解析的研究と解析に必要な破壊特性値を求める実験的研究について整理されている。極めて大きな構造物ならば線形破壊力学の適用も可能になると言われているが、その適用範囲については未だ明確ではない。今後、破壊進行領域の広がり方が構造物の大きさ(あるいはリガメント長さ)と関係づけられれば、線形破壊力学と非線形破壊力学の適用範囲が明確になるものと期待され、より実用的な計算コードが開発されれば実務者にも広く利用される可能性も出てくるものと期待される。

## 7. むすび

特に近年「コンクリートの破壊力学」に関する研究が精力的に行われており、コンクリートの破壊現象に関する新たな知見の報告や種々の力学モデル及び解析手法が提案されている。これらの成果をコンクリート工学の諸問題に応用する事は、この分野に新たな発展をもたらすものと期待される。末筆ながら本研究委員会の活動に御尽力戴いた委員及び関係各位に記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1)CEB : CEB-FIP MODEL CODE 1990, Final Draft, Bulletin d'information No.203~207, 1991.7
- 2)日本コンクリート工学協会 : コンクリートの破壊力学に関するコロキウム, JCI-C19, 1990
- 3)コンクリートの破壊力学研究委員会 : コンクリートの破壊力学研究委員会の活動について、コンクリート工学、Vol.28、No.10、pp.5-16、1990
- 4)Kaplan, F.H. : Crack Propagation and the Fracture of Concrete, J. ACI, Vol.58, pp.59 1-610, 1961
- 5)Hillerborg, A., Modéer, M. and Petersson, P.E. : Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, Cement and Concrete Research, Vol.6, pp.773-782, 1976
- 6)RILEM Draft Recommendation (50-FMC) : Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285-290, 1985
- 7)Cornelisse, H.A.W., Hordijk, D.A. and Reinhardt, H.W. : Experiments and Theory for the Application of Fracture Mechanics to Normal and Lightweight Concrete, Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, (ed. F.H. Wittmann), Elsevier Science Publishers B.V., pp.565-575, 1986
- 8)Wittmann, F.H., Rokugo, K., Bruhwiler, E., Mihashi, H. and Simonin, P. : Fracture Energy and Strain Softening of Concrete as Determined by Means of Compact Tension Specimens, Materials and Structures, Vol.21, pp.21-32, 1988

- 9) Rots, J.G. : Computational Modeling of Concrete Fracture. Dissertation, Delft University of Technology, 1988
- 10) Tschegg E., Kreuzer H., Zelezny M. : Fracture in Concrete under Biaxial Loading - Numerical Evaluation of Wedge Splitting Test Results, Fracture Mechanics of Concrete Structures, (ed. Z.P. Bazant), Elsevier, pp.455-460, 1992
- 11) 土木学会 : コンクリート標準示方書【平成3年版】設計編、1991.7
- 12) Blaauwendraad, J. & Wang, Q.B. : Systematic Fracture Mechanics Study of Shear Failure in Beams under Distributed Load, Structural Concrete, IABSE Colloquium Stuttgart, 1991.4
- 13) Bazant, Z.P. : Size Effect in Brittle Fracture : Concrete, Rock, Metals, J. Eng. Mech., ASCE, Vol.110, No.4, pp.518-538, 1984
- 14) Hillerborg, A. : Fracture Mechanics and the Concrete Codes, Fracture Mechanics : Application to Concrete, ACI SP-118, pp.157-169, 1989