

論文

[2049] 鉄筋コンクリート構造物のせん断破壊に与える変形速度効果

正会員○竹田仁一（熊本工業大学）

正会員 高本秀幸（熊本工業大学）

谷川達彦（熊本工業大学）

1. まえがき

大地震、衝撃などによって鉄筋コンクリート構造物に発生するせん断クラックを防止することは古くて新しい問題であり、種々の提案はなされているもののまだ根本的な解決にはいたっていない。

筆者等は昨年引き続き、破壊力学にもとづくモードⅡのモルタル試験体（形状は図1中に示す）によるせん断クラック拡大実験を行い、以下に報告するように脆性的なせん断クラックの拡大が高速変形時のクラック進展抵抗力（crack extension resistance¹⁾）の激減の結果発生すると考えられる結果を得た。つまり、この場合のクラック拡大には、大きなエネルギーは要らないのである。クラック進展抵抗力（クラック開放エネルギー G_F に等しい）は静的なせん断クラック拡大では逆に極めて大きな値を示すのである。つまり、脆性的なせん断クラック拡大はクラック拡大速度に及ぼす変形速度の影響（変形速度効果）と考えることができる。もっともコンクリート中のクラック拡大に及ぼす載荷速度の影響については既に、モードⅠの実験（試験体形状は図4中に示す）においても認められている²⁾が、モードⅡの場合とちがって静的載荷と高速載荷の場合のクラック進展抵抗力の著しい違いは見られなかった。

ところで、上述のモードⅡのこの実験結果は破壊力学だけに限られるのであろうか。筆者の一人が以前行った鉄筋コンクリート梁せん断実験²⁾では高速載荷時、試験体が爆裂的に破壊した。斜めクラックが瞬間的に拡大したのである。そこで、これらのせん断クラックの高速拡大と上述のモードⅡの実験結果との間にどのような関係があるかを検討した。

2. せん断クラック拡大に要するエネルギー

2.1 モードⅡ試験体の静荷重実験

試験体（昨年度と同じ³⁾。後出図1中に示されている）に載荷し、荷重を次第に増加すると、あらかじめ設けてある初期クラックは僅かに（記録には殆ど表れないが）その深さを拡大する。しかし、荷重を取り去ると拡大もまたとまる。ところが、荷重がある限界を超過すると、クラックは際限なく拡大してしまう。これがクラックの不安定拡大である。この限界荷重から限界応力拡大係数（破壊靱性）が求められる。

図3-(a)はモードⅡ試験体の静的載荷によるクラック拡大実験の記録例で、Pは荷重、 δ は上端の変位、CGはクラックゲージの出力を示し、横軸は時間 t である。この実験の平均載荷速度 $\bar{P}$ は11.2 kgf/sである。CG記録の始点はクラック不安定拡大の始点と考えることができるので、上述の限界荷重は図中P-t曲線上の点Aとして求められる。図3には参考のため、以前行ったモードⅠの実験⁴⁾の記録例（(b):静荷重、(c):中速実験、(d):高速実験）も示した。点Aは(a)の場合と同じ意味をもっている（図中aはクラック拡大深さである）。これらの点Aの荷重から求めた破壊靱性の値を表1に掲げた。ただし、モードⅡの値は試験体寸法を無限大と仮定して計算している。この表からモードⅡの静荷重実験の値がモードⅠの静荷重実験の場合の2倍に近いことが知られる。応力拡大係数はクラック先端の応力の大きさに関係する値である¹⁾から、モードⅡのせ

ん断クラックは先端のせん断応力の値がモードⅠの場合の引張り応力の大きさよりかなり増大するまで不安定拡大を開始しないことがわかる。

図1はモードⅡ試験体（初期クラック深さ10mmの場合）の静荷重実験における荷重 P と試験体先端の変位 δ の関係を示している。 $\delta = 0.9$ mmで荷重は殆どゼロになるが、この時点では図3-(a)から推測されるようにせん断クラックは既に試験体の全断面に拡大している。図1からモードⅠの場合⁵⁾と同様にこの実験の限界エネルギー解放率 G_F が求められる。その平均は 2.73 kgf/cm (2690 N/m)である。この値はモードⅠの実験例(200 N/m 以下⁵⁾)と比較すると極めて大きいことが知られる。

2.2 モードⅡ試験体の衝撃実験

モードⅡ試験体の衝撃実験の装置、実験方法等は昨年の報告³⁾と同じである。実験結果から歪波を弾性波と仮定して鋼柱から試験体に透過した歪波の大きさを求めた。図2には衝撃による歪波が鋼柱中を伝播し、試験体に透過する状況を描いている。図中のSG2、SG4は鋼柱に貼り付けたゲージで、その記録歪波が鋼柱を伝播し、その一部が試験体に透過し、更にその一部が下端で反射する。そこで、試験体に透過した歪波の例えばC点における歪は歪波 $A_1B_1C_1$ と A_2C_2 の合成によって発生するとした。この例の場合はその値は 912μ で、透過波歪の最大値であるこの値から試験体に作用した最大荷重を求めた。その値は 2070 kgf である。ただしヤング係数を $2.54 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とした。この値をモードⅡ静荷重実験の場合（その例は図1にある。最大荷重の平均値は 4390 kgf である）と比較すると、衝撃実験の最大作用荷重の大きさは静的実験の場合の半分にも充たないことが知られる。クラック拡大速度も極めて大きいことは既に報告した³⁾。

表1 モードⅡ及びモードⅠモルタル試験体の実験から求めた破壊靱性の平均値

	モードⅡ	モードⅠ ^{*2)}		
	静荷重実験	静荷重	中速	高速
破壊靱性 ($\text{kgf/cm}^{3/2}$)	165 ^{*1)}	95	120	220
平均荷重速度 P (kgf/s)	11.2	7.0	7.4×10^4	1.4×10^6

*1): 初期クラック深さ10mm

*2): (初期クラック深さ/試験体の巾) = 0.25

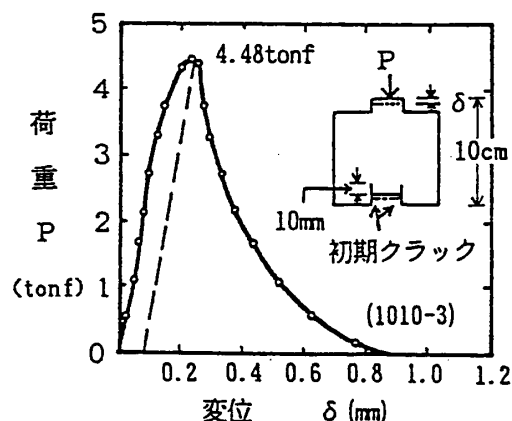


図1 モードⅡ静荷重実験における荷重・変位曲線の例（初期クラック深さ10mmの場合）

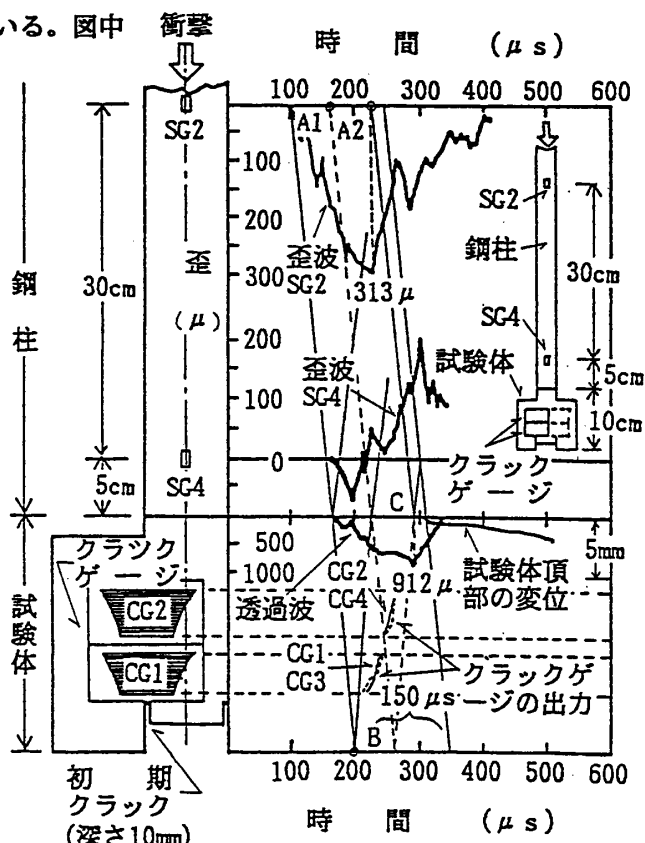


図2 モードⅡ衝撃実験の応力波とクラックゲージの記録及び応力波解析

2.3 クラック拡大に要するエネルギーの考察

モードⅠの静荷重実験の場合、図3-(b)のP-t曲線は荷重Pが点Aに達すると直ちに下降を始め、クラックが一気に拡大することがわかる。しかし、モードⅡの静荷重実験(図3-(a))では荷重PがAに達した後も引続いて増大している。丁度これと同じ傾向はモードⅠの中速実験(図3-(c))及び高速実験(同図(d))でも認められるが、これは昨年の報告で述べたように、中速及び高速実験ではクラック拡大に運動エネルギーが必要であり、それを補給するため荷重の増大が必要になると考えられる。

この説明をモードⅡの静荷重実験に適用すれば、せん断クラックが静的に拡大するとき何らかの

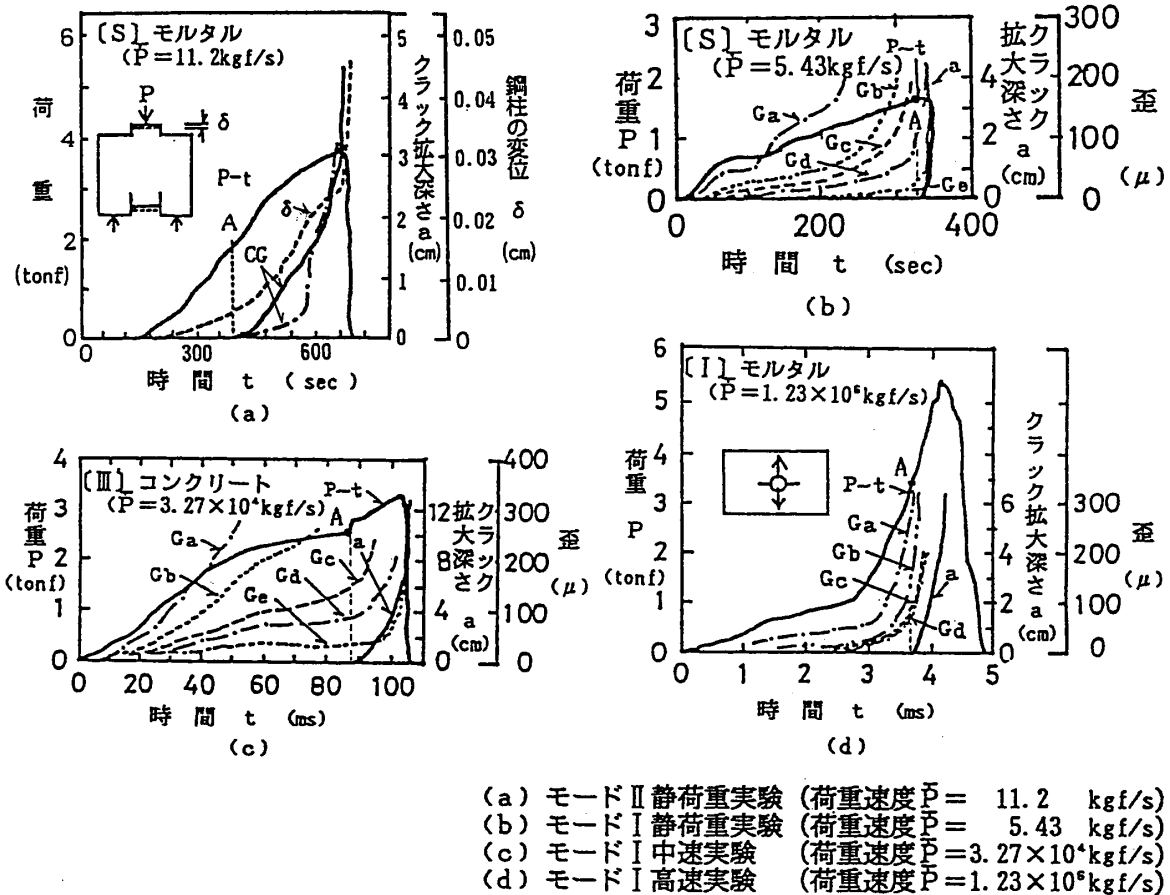


図3 モードⅡ及びモードⅠの実験記録例

エネルギー消費機構が存在しなければならない。破壊靱性もモードⅠの場合より大きいことを前に述べた。このようなせん断クラック静的拡大の特異性の理由は図4及び写真1によって理解される。図4は実験後の試験体の側面を画いており、静荷重実験(a)の場合せん断面が厚さをもった帯のように見える。このことは破断面の電子顕微鏡写真(写真1-(a))でより明確になる。クラックが破断面の垂直方向にも伸びていることがわかる。

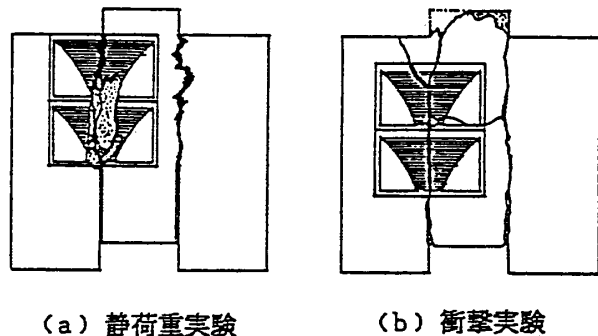
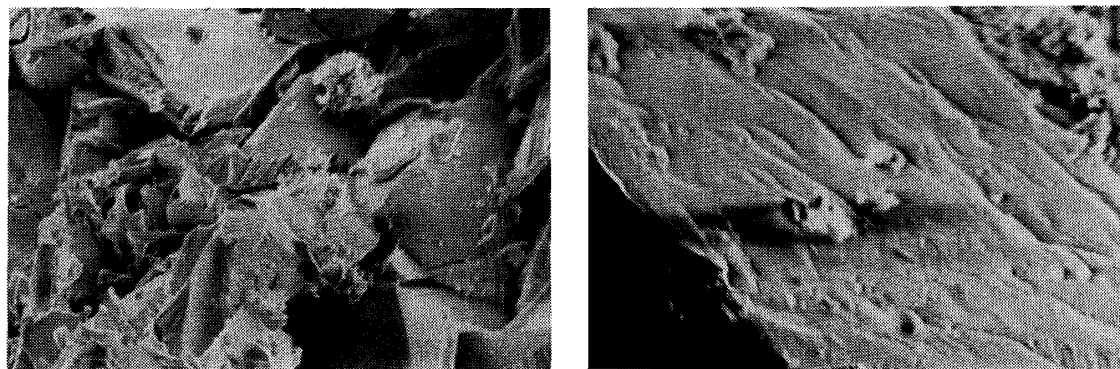


図4 モードⅡ実験における破断試験体の側面

一方、衝撃実験の破断面は写真1-(b)で見られるように静荷重実験の場合と全く異なり、脆性的なクラック拡大を特徴づけるへき開面が明確に認められる。このことがモードⅡ衝撃実験において試験体に透過する荷重の大きさが静荷重実験の場合よりかなり小さいにもかかわらず極めて高速に拡大した理由と考えられる。即ち、せん断クラックは静的拡大にはかなり大きなクラック進展抵抗（大きさは G_F に等しい）があって拡大し難いが、衝撃実験では逆に小さなエネルギーで拡大することが知られる。



(a) 静荷重実験

(b) 衝撃実験

写真1 モードⅡ実験における試験体破断面の電子顕微鏡写真

3. コンクリートまたは鉄筋コンクリート構造部材のせん断破壊

上述のモードⅡの実験結果は実構造物のせん断破壊にも発生するのだろうか。この実験ではせん断断面の上端、下端の位置を強制的に定めており、実構造物の場合と違っている。しかし、実験の状態に近い次の破壊例がある。あるガス爆発事故で鉄筋コンクリート床スラブが垂直な面でせん断された（写真2）。スラブの下面から圧力をうけ、上部の大きな慣性力をもつブロック壁の端が刃のように働いて高速にせん断されたことを示している。なぜなら、同時に切断された鉄筋はスラブの破断面より1mm程度内側に入って、その面が極めて平滑であったが、これらの鉄筋及びコンクリートの破断面が、既に知られていた高速せん断実験^{6), 4)}の結果と共通の特徴をもっていたからである。スラブの静的な変形ではよく知られているように鉄筋に延性破壊が生ずる。

このように、高速にせん断された場合静的載荷では予想し得ない破壊が発生することがある。ところで鉄筋コンクリート構造部材に発生するせん断クラックは通常、斜め方向に発生する。鉄筋コンクリート梁高速せん断実験の場合を説明しよう。この実験は筆者の一人が以前行ったもの⁷⁾で、鉄筋コンクリート

梁（15cm×20cm×260cm、鉄筋は上下に3-9φまたは3-16φ、あばら筋6φ）を図5中に示したようにN型（大野式）でせん断力を加えた。有効せん断スパン比

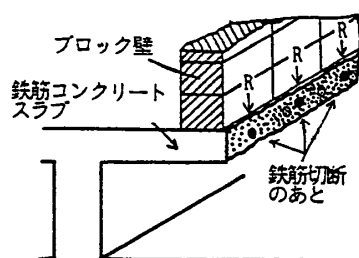


写真2 面に垂直にせん断された鉄筋コンクリート床スラブ



M/Qd は約1で3段階の載荷速度（静荷重：平均変位速度 $\bar{\delta} = 2 \sim 9 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ，中速： $1 \sim 3 \text{ cm/s}$ ，高速： $2 \sim 4 \times 10^2 \text{ cm/s}$ ）で実験を行った。計測は荷重をロードセル（LC1，LC2）、変位をポテンシオンメーターで、載荷点対面の歪を歪ゲージG1，G2で、側面对角線方向の歪をG4、鉄筋の歪をG3を使って行った。

図5は静荷重実験の計測例で、時間軸（横軸）に対して荷重P1，P2（それぞれLC1，LC2の出力）、変位 δ 及び歪ゲージの出力が画かれている。目視によって記録したクラック発生（写真3）の大よその時点も

記入した。これらから次のような変形の進展を知ることができる。荷重が増加するに従い、まづ、ゲージG1，G2の出力が増大し、その付近に最初のクラックが発生する。新しい曲げクラックが次々と広い範囲に生ずるが、この時点では対角線方向のゲージG4は引張りを示している。しかし、更に荷重が増大し、せん断スパン両端の載荷点に向かう斜めクラックが発生し、せん断スパン中央にそれらに取り囲まれた平行四辺形の部分が見られる時点でG4の出力は突然引張りから圧縮に逆転する。この頃から鉄筋の伸び（G3）が急増し、梁は降伏をする。その後の変形はせん断スパンに生じた平行四辺形の部分のコンクリートが上下の

鉄筋の間で回転するように発生し（この変形でG4の出力は圧縮になる）、終局を迎える。最大変形量はこの平行四辺形の部分の変形能で定まり、 16ϕ を用いた梁より 9ϕ を用いたものが大きな変形を示した。中速及び高速実験では、このような変形の進展を直接見ることはできないが、上述の静荷重実験の場合と同様の経過を示す実験記録が多数見られ、かつ破壊形も殆ど同様であった（写真4）。従って、これらの試験体においてもG4の出力が引張りから圧縮に逆転する時点の前に、静荷重の場合と同様二つの斜めクラックが既に発生していたと考えることができる。

このような推定が許されるとして、G4出力が逆転する時点のせん断力 Q_0 と平均変形速度 $\bar{\delta}$ の関係を描き、図6を得た。この図から Q_0 が全載荷速度を通じ、あまり大きな変化がないことが知られる。中速及び高速載荷実験では静荷重実験の場合より、かなり大きな最大荷重（特に高速載

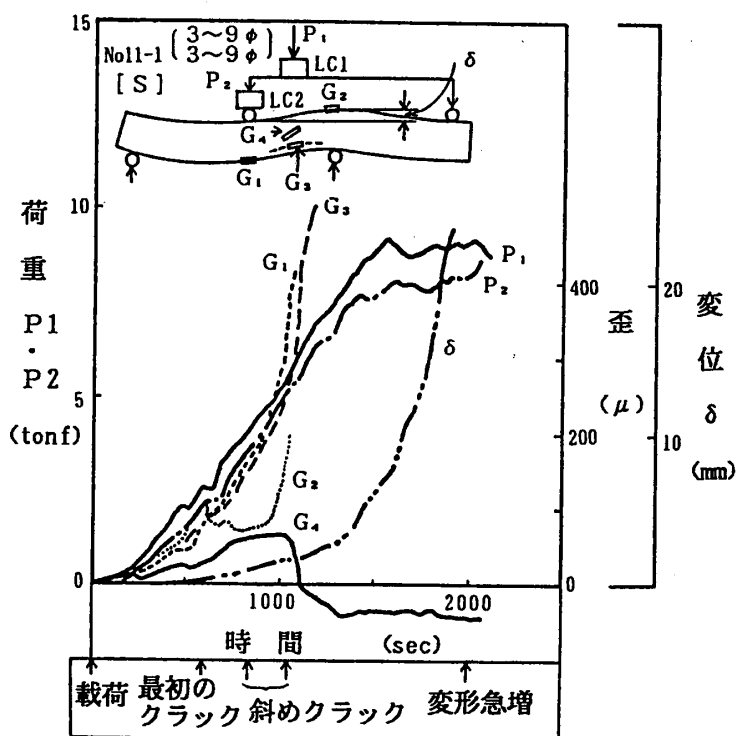


図5 鉄筋コンクリート梁高速せん断実験の記録例（静荷重実験）

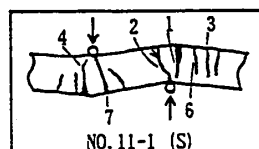
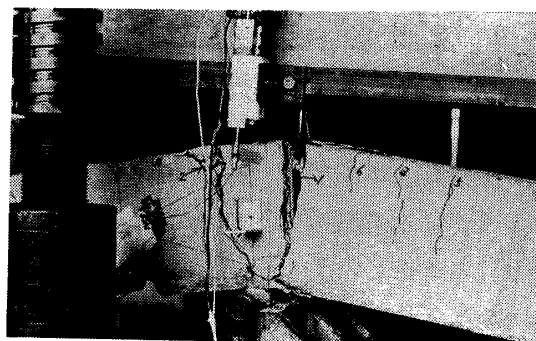


写真3 静荷重実験の破壊例

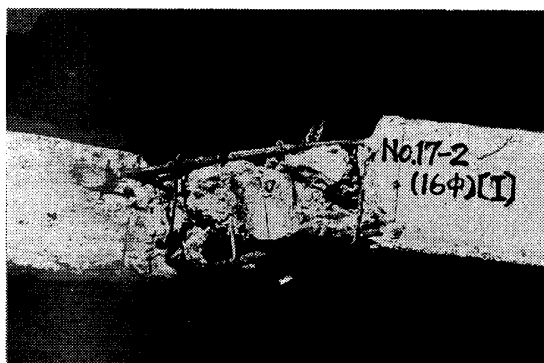
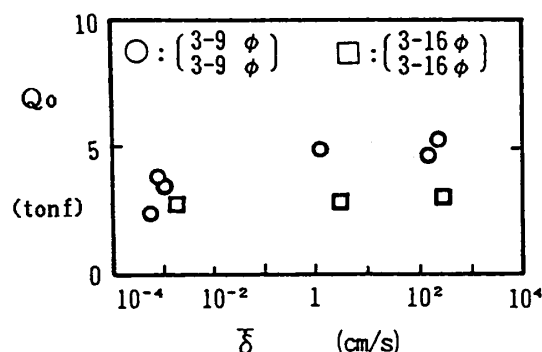


写真4 高速実験の破壊例

図6 ゲージG4の出力が逆転する時点のせん断力 Q_o と平均変位速度 δ の関係

荷において。これは鉄筋の上位降伏点応力に対する速度効果のためと考えられる)を示している²⁾。従って、特に高速載荷実験において、載荷の極めて初期の段階で斜めクラックが発生すると考えられる。これは上述の推定にもとづくものとはいえ、高速載荷実験では梁は爆裂的に破壊し、より低速の場合と著しい違いを示した。このようなことから鉄筋コンクリート梁のこの実験においても、前述のモードⅡの衝撃実験で知られたように、高速載荷のもとではせん断クラックが容易にかつ極めて高速に拡大するという特徴が影響していると考えられる。

4. 結論

- 1) 破壊力学におけるモードⅡのモルタル試験体静荷重実験から得られた限界応力拡大係数(破壊靱性)はモードⅠの静荷重実験の値の約2倍となった。従って、せん断クラックの不安定拡大の開始は、静的載荷のもとでは引張りクラックの場合よりおこり難いことが知られた。
- 2) モードⅡの静荷重実験で得られた解放エネルギー G_F もモードⅠの静荷重実験の場合より著しく大きく、そのためせん断クラックが静的に拡大し難いことが知られた。また、せん断面の電子顕微鏡写真の検討からこの場合、せん断クラックが極めて複雑に拡大することがわかった。
- 3) モードⅡ試験体の衝撃実験では試験体に透過した応力波の応力が静荷重実験の半分にも満たない大きさでクラックが高速に拡大した。破面の電子顕微鏡写真からもクラックが脆性的に拡大したことが認められた。これはクラック拡大に対する速度効果によると考えられる。
- 4) せん断クラックの脆性的拡大が実際の鉄筋コンクリート構造物にも発生するかどうかを検討した。或るガス爆発事故における床スラブの鋭利なせん断破壊がその1例であることが知られた。
- 5) 鉄筋コンクリート梁の高速せん断実験において爆裂的なせん断破壊が発生したが、この場合も高速載荷時のせん断クラック拡大の特性が影響したと考えられる。

[参考文献]

- 1) 岡村弘之; 線形破壊力学入門, 培風館
- 2) 竹田外; 関東地震50周年記念地震工学シンポジウム, 1973, 69~79
- 3) 竹田外; 第10回コンクリート工学年次講演会論文集, 1988, 273~278
- 4) J. Takeda et al.; RILEM. CEB. IABSE. IAASS Int. association Sympo, Berlin, BAM, 1982, S2-83~91
- 5) 三橋博三; コンクリート工学 Vol. 25, No. 2, Feb. 1987, 14~25
- 6) 竹田外; 日本建築学会大会号(昭44), 1969, 1009
- 7) 竹田外; 日本建築学会大会号(昭45), 1970,
- 8) 竹田外; 日本建築学会九州支部研究報告, 1989, 117~120