

論文

[1029] モードⅠモルタル供試体のクラック拡大に与える速度効果

正会員○高本秀幸（熊本工業大学）

正会員 竹田仁一（熊本工業大学）

谷川達彦（熊本工業大学）

1. まえがき

重化学工業施設、大型タンク等が都市近郊に多数存在する我が国において、ひとたび大地震などの不慮の災害に見舞われた場合を考慮すると重要施設の設計には爆発、衝撃等も考慮に入れた動的設計方法が必要であると考えられる。筆者等はこのような設計方法の開発に不可欠な構造物の脆性破壊の防止を目的として、コンクリート及びモルタルについての破壊力学に基づく実験研究を行って来た。本報告はその一環として昨年度に引き続いて行ったモードⅠ、3点曲げモルタル供試体のクラック拡大実験について述べたものである。

2. 実験の目的及び既往の研究との関係

筆者等はかなり長期にわたり（昭和54年¹⁾以降）コンクリート及びモルタルについて破壊理論に基づく実験研究を行って来た。それらの主要な結果及び今回の実験の目的について説明する。

構造物が何等かの災害を受けて破壊するとき、ほとんど全ての場合、破壊は高速に進展する。クリープ変形の場合でさえ、その最終的な破壊は静的には起こらない。これらの破壊はそれまでの変形過程で構造物中に発生したクラックが広範囲に拡大して起きると考えられ、応力のある限界（この応力から限界応力拡大係数、破壊靱性が求められる）を越えると、荷重の増加に関係なくクラックは拡大を継続する。静的線形破壊力学ではこれを、クラック表面エネルギー等が関与するクラック拘束エネルギーと、クラック拡大にともなう解放エネルギーとの、増加の傾向が異なり、この限界を境として後者の増加が支配的になるためと説明している²⁾。従ってこの理論によれば、その段階では強制的にクラックを閉じる機構がない限り、クラックは自動的に拡大し最終的な破壊に到達することになる。

一方、上記の限界を超す以前の安定拡大領域では、クラックを拡大させるには必ず荷重を増加させなければならない。しかし、筆者等の既往の研究で、静荷重時明瞭な安定クラック拡大領域が認められたのはモードⅡ（せん断クラック）の場合³⁾だけで、モードⅠ（引張りクラック）の実験では認められなかった。モードⅡの静荷重実験ではクラック拘束エネルギーは著しく大きくなるので、せん断クラックの静的拡大は極めて起こり難いことも知られた。

構造材料、構造物等に荷重が高速に作用すると速度効果が発生し、その力学的性質は静的載荷の場合と同じではない。筆者の一人が以前報告した⁴⁾ように、二つの効果のうちのひとつ、破壊限界に対する速度効果によって破壊発生時の応力、歪の大きさは載荷速度（歪速度）によって大幅に変化する。このことから知られるように破壊力学上の限界応力拡大係数（破壊靱性）にもまた、同様の速度効果が発生することを筆者等は実験的に明らかにした⁴⁾。荷重が高速に作用するとき、もし、破壊靱性が静的載荷時の値より大きくなれば、この性質は構造物の動的設計にとって有利な性質である。しかし、せん断クラック高速拡大実験³⁾では全く逆で、クラック拘束エネルギーが著しく低下することが知られた。つまり、高速載荷のもとではせん断クラックは容易に拡大するのであるが、この傾向はクラック破面の構造に基づくものであること

を電子顕微鏡写真で明らかにした。

上述の速度効果で述べた限界応力拡大係数は、クラックが準静的な安定拡大を経て不安定拡大を開始するときの「静的応力拡大係数 K_{Ic} 」である。動的に拡大しつつあるクラック先端の応力状態について Freund は静的な場合と類似の式で「動的応力拡大係数」を定義した⁵⁾が、この値は対応する「静的応力拡大係数」にくらべ、クラック拡大速度が大きくなると小さくなることを示した。また、「静的エネルギー解放率」に対応する「動的エネルギー解放率」も定義してこの値にも上述の応力拡大係数と同様の傾向のあることを示した。更に、このことから、動的に進行しつつあるクラックの拡大速度が次第に増大することも示したが、この傾向は筆者等の実験でも認められている。

クラック拡大速度が増大し、構造物が脆性的に破壊するようになる傾向は、動的設計にとってもうひとつの重要な問題である。その為、実験ではクラックが不安定拡大を開始した後の拡大速度を測定した。既往の理論的研究からクラック拡大速度の最大値は材料のレイリー波速度と考えられている⁶⁾が筆者等の実験では約 1000m/sの最大速度が測定されている。このようなクラック高速拡大ではクラックは、曲がりあるいは枝別れが発生することを E. H. Yoffe はモード I の場合について理論的に明らかにした⁷⁾が、筆者等のモード I、引張型供試体の実験¹⁾でもクラックの曲がりや枝別れが認められた。

この報告の実験は、モード I の実験が通常 3 点曲げで行われるので、この載荷方法の実験結果と従来の結果とを比較検討するために行ったものである。また、クラック拡大距離が長くなった場合の拡大速度及び破壊力学における相似則の検討を目的とする実験も加えた。

3. 実験

実験は二つのシリーズに分けて行った。シリーズ 1 では、モルタル製モード I、3 点曲げ型供試体のクラック拡大実験、シリーズ 2 は、モード I、3 点曲げ型供試体における、供試体寸法効果についての実験である。

〔シリーズ 1〕供試体は図 1 に示す幅 (L) × 高さ (W) × 厚さ (B) = 50cm × 10cm × 3cm (スパン (S) 40cm) のモルタル製 3 点曲げ型モード I 供試体である。所定の深さ (a_0) の初期クラックを設けるため、型枠中央下部に幅 1, 2, 3cm (a_0 に等しい) のりん青銅薄板を設置しておいてモルタルを打設した。開口量はりん青銅板の厚さ (0.05mm, 0.08mm, 0.10mm の 3 種) で変化させ、合計 72 体を作製した。使用した材料の性質及びモルタルの力学的性質は表 1, 2 に示す。実験は静的載荷と衝撃載荷の 2 種で、静的載荷には油圧式万能試験機 (島津 RH-20) を、衝撃載荷には既報⁸⁾の応力波透過式衝撃試験機を使用した。

計測は、静的載荷の場合はロードセル (東京測器 TCLZ-1000KA) によって荷重を、衝撃載荷の場合は図 1 に示す鋼柱に貼付した半導体ゲージ (東京測器) により載荷歪波を測定し、また、ロードセルまたは鋼柱下端の変位及び試験体下端でのクラック開口変位 (CMOD, 図 1 中に示した測定用フレームでは、非接触微小変位計 (カマン) を使用して測定した。また、クラック拡大長さの時間的变化は、初期クラック端

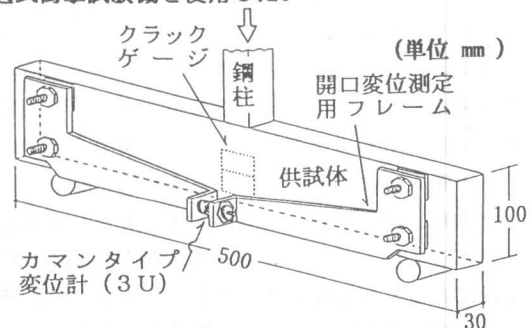


図 1 モード I、3 点曲げ型供試体及び CMOD 測定フレームを取り付けた状態

表1 材料の性質

		シリーズ1	シリーズ2
普通ポルトランドセメント (C)	比重	3.15	3.15
	強度	433.5kgf/cm ²	419.1kgf/cm ²
川砂 (S)	粗粒率	3.06	2.82
	絶乾比重	2.56	2.57
	吸水率	2.57 %	2.65 %

表2 モルタルの力学的性質 (kgf/cm²)

		シリーズ1	シリーズ2
モルタル	実験時の静的圧縮強度	319.6 { 505.1	307.0 { 467.0
	平均	390.0	401.0
S/C=3 W/c=65%	ヤング係数の静的	1.87×10 ⁵	2.24×10 ⁵
	平均	2.31×10 ⁵	2.71×10 ⁵
材令	平均	2.15×10 ⁵	2.50×10 ⁵
養生	材令	122 ~ 993	115 ~ 125
	養生	水中養生 (4週) + 空中養生	散水養生 (2週) + 空中養生

に接して貼付した2枚のクラックゲージ (東京測器FAC-20) の出力から計算した。これらの出力は、シグナルコンディショナー (共和電業 CDV-230C, 周波数帯域 DC-200KHz)、デジタルメモリー (岩通 DM7100, 周波数帯域 DC-100KHz) 及びペンレコーダー (横河 LR8100) を使用して増幅、記録した。

註) 散水養生とは型枠上面に1日1回ジョーロで散水し、ウエスで覆って養生を行ったもの。

〔シリーズ2〕供試体形状はシリーズ1と同じで、寸法比 (n) を 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 の5種に変化させ、初期クラック深さ (a₀) と供試体高さ (W) との比 (a₀/W) は 0.3, 初期クラック開口量は 0.6mm とした。使用した材料の性質、モルタルの力学的性質は表1, 表2に、供試体寸法と数量を表3に示した。

計測はシリーズ1と同じで、実験は静的載荷だけである。供試体下端の開口変位 (CMOD) の測定には、パイ型変位計 (東京測器 PI-2-50) を使用した。

表3 シリーズ2, 供試体寸法及び数量

供試体名	n	L cm	W cm	B cm	a ₀ cm	S cm	数量
SE-1.0	1.0	50	10	3	3	40	3
SE-1.5	1.5	75	15	4.5	4.5	60	2
SE-2.0	2.0	100	20	6	6	80	2
SE-2.5	2.5	125	25	7.5	7.5	100	2
SE-3.0	3.0	150	30	9	9	120	2

4. 実験結果及び考察

以前行ったモードI, 引張型供試体 (モルタル) ¹⁾ 及びモードII 供試体 (モルタル) ²⁾ の実験結果と併せて考察を行う。

4.1 静荷重実験

図2にモードI, 3点曲げ型供試体の静荷重実験の計測例を示す。図中Pは荷重、δは供試体中央上端の変位、aは拡大中のクラック長さ (クラックゲージの出力より計算)、CMODは供試体下端のクラック開口変位を示し、横軸は時間tである。

載荷は繰り返し漸増荷重 (0 → 50kgf → 10kgf → 100kgf → 10kgf → P_{max})

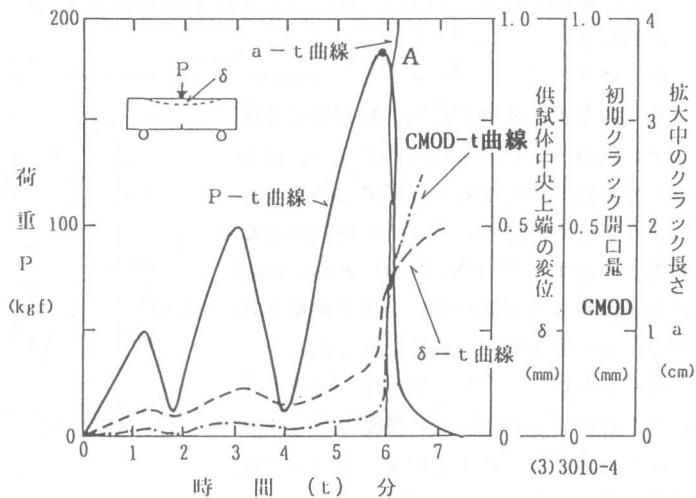


図2 静荷重実験の計測例

で行ったが、荷重が増加するにつれて供試体の変位 (δ)、端部でのクラック開口変位 (CMOD) も増加し、荷重が減少するとそれらも減少する。しかし、クラックの拡大はほとんど認められない。荷重が増加して限界点を超過すると、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、この限界荷重より限界応力拡大係数 (破壊靱性) が求められる。

図2の例では、CMODが0.06mm程度 (平均では0.14mm) に達した時点でクラック拡大が始まり、また変位も急増する。それとほぼ同時に荷重は最大値に達し、供試体は破壊し実験は終了する。このクラック拡大が急増する点がクラック不安定拡大の始点と考えられるので、上述の限界荷重はP-t曲線上の点Aとして求められる。点Aの荷重より下式⁹⁾によって求めた限界応力拡大係数 K_{Ic} を表4と図3に示した。

$$K_{Ic} = \sigma_0 \sqrt{\pi a_0} \{1.09 - 1.735(a_0/W) + 8.2(a_0/W)^2 - 14.18(a_0/W)^3 + 14.57(a_0/W)^4\}$$

ただし $\sigma_0 = 3SP/2BW^2$ a_0 :初期クラック深さ P:荷重 W,B:供試体高さ, 厚さ S:スパン

この結果から、モードI, 3点曲げ型供試体の静的限界応力拡大係数 K_{Ic} は、初期クラック深さが深くなるにつれ、わずかに大きくなる傾向があり、その値は、 $a_0/W = 0.1, 0.2, 0.3$ の時それぞれ91.5, 97.4, 115.0 $\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-3/2}$ であった。モードI, 引張型の実験では a_0 を一定とし、Wを変化させたので単純に比較は出来ないが、その値は、3点曲げ型の値に近い。一方モードII供試体の静的限界応力拡大係数は初期クラック深さによつて大きく変っており、モードIの場合と著しい違いを見せている。また、モードIIの場合は、上述のようにクラックの不安定拡大が始まる前、既にながりの安定拡大が進んでおり、クラック安定拡大中は荷重の増大が必要なため、モードIIの限界応力拡大係数はモードIの場合より大きく (約2~2.5倍) なる。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から⁹⁾このことから

静荷重の場合、モードI供試体のクラック (曲げ及び引張り) はモードIIの場合より小さい応力で不安定拡大を開始することがわかる。

表4 モードI及びモードIIモルタル供試体の静荷重実験から求めた破壊靱性の平均値

	モードI							モードII		
	3点曲げ型			引張型						
a_0/W	0.1	0.2	0.3	0.15	0.25	0.39	0.58	0.125	0.25	0.375
破壊靱性 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-3/2}$)	91.5	97.4	115.0	109.1	103.4	80.2	59.8	181.7	214.9	278.7
平均荷重速度 (kgf/s)	1.13			7.0				11.2		

図4はモードI, 3点曲げ型供試体の静荷重実験における荷重Pと供試体の変位 δ の関係であり、図の面積から供試体に加えられた外力仕事を計算することが出来る。大よその回復可能な弾性歪みエネルギーの分を除いた図中斜線部分の面積より文献10中の9式で破壊エネルギー G_F を求め¹⁰⁾表5に示した。

表によれば、モードII供試体 (モードIと同じ方法で求めた) では初期クラック深さによる違いは大きくないが、モードI供試体では、初期クラックが深くなるにつれ、破壊エネルギーは小さくなる傾向が見られ

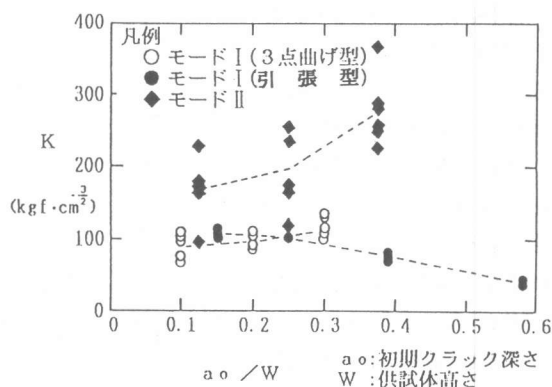


図3 限界応力拡大係数と初期クラック深さの関係

る。また、その値は、せん断クラックの $1/20 \sim 1/50$ であることがわかる。

シリーズ2の実験結果を図5に示す。この図にクラックが不安定拡大を開始する時点での曲げ応力度 σ_c 及びこの値から求めた限界応力拡大係数 K_{Ic} とスパン S の関係である。この実験では初期クラック深さ a_0 とスパン長さ S は比例しているから、この関係は S と K_{Ic} または a_0 との関係と考えられる。もし K_{Ic} が破壊理論で仮定するように材料固有の定数ならば、 σ_c は a_0 の $1/2$ 乗に反比例することになるが、図からおおよそこの関係が成立することが認められる。従って、相似則は概ね成立することが知られた。

4. 2 衝撃実験

図6はモードⅠ、3点曲げ型供試体の衝撃実験の計測例である。鋼柱から供試体に透過した歪波の大きさは、弾性波と仮定して求めた。この例の最大値は 555.2μ でこの値から推定される最大荷重は 1259 kgf となる（モルタルのヤング係数は速度効果を考慮して $2.54 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とした）。その平均値は、初期クラック深さ 1 cm の時 743.9 kgf ,

2 cm の時 852.6 kgf , 3 cm の時 835.9 kgf

となった。これらの値に対応する静荷重実験の値は 269.7 kgf , 197.1 kgf 及び 183.2 kgf であったから、モードⅠ、3点曲げ型供試体の衝撃実験の限界応力拡大係数（破壊靱性）は、静荷重実験の場合の3～5倍に増大すると推定される。これは速度効果によるものと考えられる。

図7にクラック拡大速度と载荷速度の関係を示す。図には、モードⅠ、引張型供試体（モルタル）及びモードⅡ供試体（モルタル）の実験結果も併せて描かれている。モードⅠ、3点曲げ型供試体のクラック平均拡大速度は静荷重実験の場合 $0.2 \text{ m/s} \sim 3.0 \text{ m/s}$, 衝撃実験の場合 $700 \text{ m/s} \sim 1000 \text{ m/s}$ であった。

しかし、この実験ではモードⅠ、引張型供試体の場合のようにクラックの曲がりは見られなかった。3点曲げ型供試体では中立軸からの距離により応力状態が変化するためと考えられる。

5. 結論

モードⅠ、3点曲げ型供試体（モルタル）のクラック拡大実験を静的载荷と衝撃载荷で行った。この実験結果と以前行ったモードⅠ、引張型及びモードⅡの実験結果を比較し次の結論が得られた。

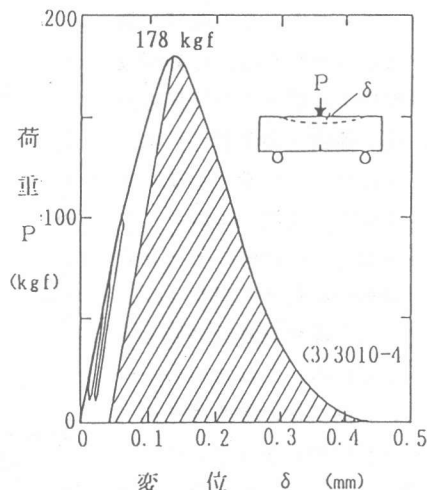


図4 静的载荷実験の荷重～変位曲線の例

表5 モードⅠ及びモードⅡモルタル供試体の静荷重実験から求めた破壊エネルギー G_F

	モードⅠ (3点曲げ型)			モードⅡ		
	a_0 / W	0.1	0.2	0.3	0.125	0.25
G_F (kgf/m)	16.9	10.0	8.5	301.8	299.8	250.8

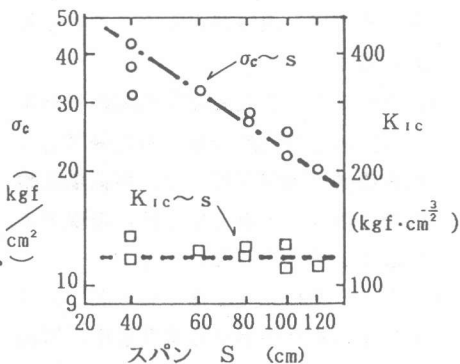


図5 限界曲げ応力度・限界応力拡大係数とスパンの関係

(1) モード I, 3点曲げ型供試体 (モルタル) の静荷重実験より得られた限界応力拡大係数 (破壊靱性) は、初期クラック深さが深くなるにつれて僅かに大きくなった。この傾向はモード I, 引張型の場合と異なるが、これらはかなり近い値を示している。これに対しモード II 供試体の場合はその 2 ~ 2.5 倍となっている。

(2) モード I, 3点曲げ型供試体 (モルタル) の静荷重実験より求めた破壊エネルギーは、初期クラック深さが深くなるにつれて小さくなる傾向にあり、モード II の場合の 1/20 ~ 1/50 であった。

(3) シリーズ 2 の実験において限界曲げ応力 σ_c は初期クラック深さ a_0 の概ね 1/2 乗に反比例することが知られた。従って、概ね相似則が成立することも知られた。

(4) モード I, 3点曲げ型供試体 (モルタル) の衝撃実験から求めた限界応力拡大係数 (破壊靱性) は、静荷重実験の場合の 3 ~ 5 倍となった。速度効果によると考えられる。

(5) クラック拡大速度は、モード I, モード II いずれの場合も荷重速度の増加とともに大きくなった。速度効果によると考えられる。

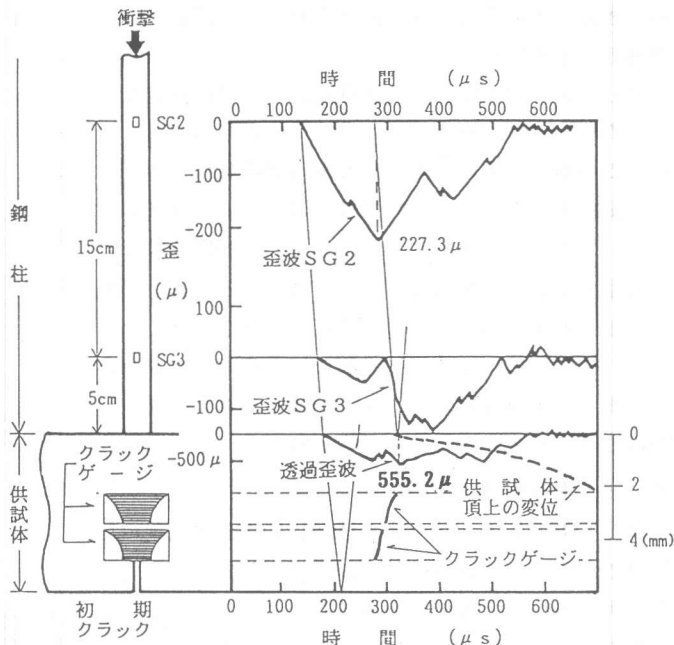


図6 衝撃実験の計測例 (2010-3)

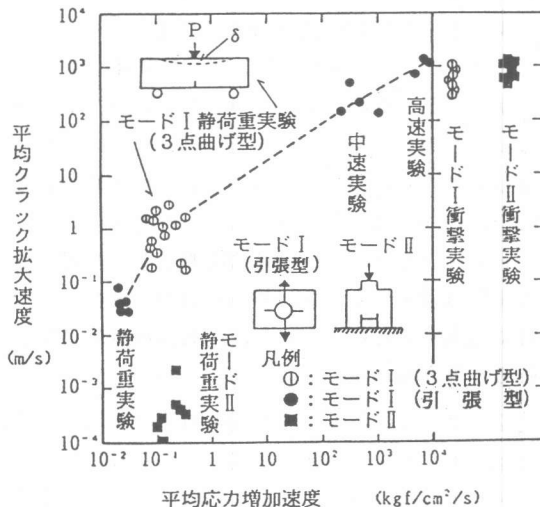


図7 モード I 及びモード II の実験における平均応力 (全断面についての) 増加速度と平均クラック拡大速度の関係

参考文献

- 1) 竹田仁一他; セメント技術年報 33 (昭54) 417 ~ 420
- 2) 例えは. R. W. Herzberg; Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, 256
- 3) Jin-ichi TAKEDA et al; Proc. of 9 WCEE, Vol. IV, August, 1988, JAPAN, 469 ~ 474
- 4) 竹田仁一; ICM-1, Vol. IV, Kyoto. 1971, 267 ~ 277
- 5) Freund; J. Mech. Phys. Solid, Vol. 20, 1972. 129 ~ 140, 141 ~ 152
- 6) K. B. Broberg; The propagation of brittle crack, Arkiv. For Fysik, Bd-18nr10, 1960, 159 ~ 192
- 7) E. H. Yoffe; The Moving Griffith Crack, Phil. Mag., Vol. 42, 1951, 739 ~ 750
- 8) 竹田仁一他; 日本建築学会大会 (東海) (昭60) 375 ~ 376
- 9) 岡村弘之; 線形破壊力学入門, 培風館
- 10) 三橋博三; コンクリート工学 Vol. 25, No. 2, Feb, 1987, 14 ~ 25