

コンクリートの圧縮応力下における 破壊力学的性質に関する研究

佐藤千之助*, 車田 亮*, 小野瀬健太郎**
今泉水城**, 福沢公夫***, 沼尾達弥***

(昭和63年 8 月31日受理)

Fracture Mechanics Properties of Concrete under Compressive Stress

Sennosuke SATO*, Akira KURUMADA*, Kentaro ONOSE**
Mizuki IMAIZUMI**, Kimio FUKUZAWA***and Tatsuya NUMAO***

Abstract - Since concrete is usually used under a compressive stress predominant state, emphasising in the fracture strengths under compression, we have carried out studies on fracture mechanics properties such as uniaxial compressive strength, diametral compressive strength and mode I and II fracture toughnesses of concrete of two kinds of water/cement ratio and four sizes of aggregate. Then a new fracture criterion under multiaxial stresses of tension and compression is derived from the fracture mechanics approach. During these fracture strength tests, acoustic emissions (AE) from these specimens are recorded at different stress levels up to the final fractures. The signals of AE were corresponded to the cracking initiations and were used for a verification of the fracture criterion.

1. 緒 言

多軸応力場のコンクリート構造物の破壊力学的な設計基準を確立することの要求から、コンクリートの破壊強度について従来、多くの研究が行われてきた⁽¹⁾。それらの多くはモード I 型の曲げや引張による破壊、すなわち、き裂欠陥が引張応力に対し直交しているような破壊についての研究である⁽²⁾。しかし、實際上コンクリートやモルタル等の構造材は主として圧縮応力場において実用されるものであるから、圧縮応力が支配的な応力場における破壊あるいはモード II 型の破壊の条件を明確にしておくことがより重要であると考えられる。

本研究においては 2 種類の水セメント比と 4 種類の骨材の最大寸法を有するコンクリートについて、圧縮強度、圧裂強度、モード I および II の破壊靱性など主として圧縮下の破壊力学的性質の検討を行い、前報⁽³⁾の 3 種類の水セメント比の場合を含め、これら諸性質に及ぼす骨材の最大寸法の影響の検討を行った。また、これら破壊試験の過程における AE (Acoustic Emission) を検出することにより圧縮が支配的な応力場の単軸圧縮試験と圧縮と引張りの二軸応力場の圧裂強度試験におけるき裂の発生および拘束、破壊モードの遷移などの潜在的な現象の検証を試みた。

* 茨城大学工学部機械工学科(日立市中成沢町)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

** 茨城大学大学院工学研究科機械工学専攻(日立市中成沢町)

Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

*** 茨城大学工学部建設工学科(日立市中成沢町)

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

2. 実験方法

2.1 試料

本研究に用いたコンクリートの配合仕様の主なパラメータは、水セメント比 $W/C=0.25, 0.60$ 、また、骨材の最大寸法 $G_{max}=2.5, 5, 10, 25\text{mm}$ の4種類とした。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂(久慈川産)、粗骨材は玉石砕石(鬼怒川産)を使用した。本研究に用いた材料試験の試験片寸法は圧縮強度試験で $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 、円弧型圧子による円板の圧裂試験で $\phi 150 \times 80\text{mm}$ および中心スリットを有する円板の圧裂による破壊靱性試験法で $\phi 150 \times 80\text{mm}$ 、スリット長さ $2c$ は 45mm である。なお、コンクリートは打込み方向により機械的強度に数%程度の異方性が生ずることが知られている^(4,5)。従って、本実験における圧縮試験片はこの影響をなくすため、縦打ち型の圧裂および破壊靱性試験に対応させて横打型を使用した。なお、破壊靱性用円板試験片の中心スリットの作製はたんざく状に切ったビニールシート(幅 45mm 、厚さ 0.3mm)におもりを付けて予め型わくに固定し、打ち込み後2日でシートを抜きスリットとした。試験片は28日間水中養生(20°C)して実験に供した。

2.2 実験装置

材料試験機は 50ton および 200ton の油圧式万能試験機を用いた。また材料試験機からの雑音を軽減させるため、試験機と圧子の間に厚さ 3mm のゴムを介在させた。また試験に先立ち圧感紙により端面に一樣圧縮が負荷されることを確かめた。AE装置は日立エンジニアリング(株)製AE200システムを使用した。AEの測定条件は以下の通りである。AE変換子はPZT圧電素子で、共振周波数 200kHz 、増幅度はプリアンプ 40dB 、メインアンプ 50dB 。バンドパスフィルター周波数帯域は $10\text{kHz}-2\text{MHz}$ 、しきい値電圧は $5\mu\text{V}$ とした。AEに関する諸量のうちAE振幅、トータル・イベント数およびトータル・エネルギーについて記録測定を行った。

2.3 実験方法

2.3.1 圧縮強度試験

圧縮試験は標準の円柱型試験片($\phi 100 \times 200\text{mm}$)を用い、下端には球面座を介して均一に圧縮した。またAEの測定はAE変換子をC型クランプによって試験片の下部より $1/4$ の高さにグリースをつけ、密着させて行った。

2.3.2 圧裂強度試験

Fig. 1(1)に示す円板の直径方向圧縮による圧裂強度は鋼製の円弧型圧子を用い、Hertzの接触幅 $2b$ を考慮した淡路と佐藤^(6,7,8)の開発した方法により測定した。

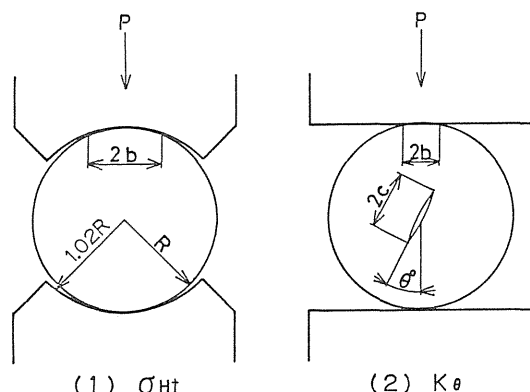


Fig. 1 Measuring method for disk specimens.
 $2R=150\text{mm}$, $t=80\text{mm}$

この方法による場合は平板圧子による場合のように接触部の強い圧縮応力による圧壊が原因のき裂誘発を防止することができ、引張りおよび圧縮の二軸応力場の圧裂強度を簡単に測定することができる。ここでは接触幅を考慮した引張応力成分をとり圧裂引張強度とした。なお、本研究における接触幅は圧感紙により測定した。圧裂引張強度 σ_{Ht} は次式で求められる。

$$\sigma_{Ht} = (1 - 1.15(b/R)^2 + 0.22(b/R)^3) \sigma_p \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

ここで σ_p は集中荷重 P により圧縮された円板(直径 $2R$ 、厚さ h)の直径軸上に生ずる一様引張応力 $P/(\pi Rh)$ 、 b は円弧型圧子による接触幅の半長である。本研究に用いた円弧型圧子の内半径 26.5mm で試料円板に対する比は 1.02 であった。

2.3.3 破壊靱性試験

Fig. 1(2)に示すような中心スリットを有する円板の圧裂試験においてスリットの傾き角 θ をかえることによりモードIおよびモードIIの破壊靱性値 K_{Ic} 、 K_{IIc} を系統的に求めることができる⁽⁷⁾。すなわち、

$$K_{Ic}, K_{IIc} = N_{IH}, N_{IIH} \sigma_p (\pi c)^{1/2} \quad (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}) \quad (2)$$

ここで $\sigma_p = P/(\pi Rh)$ 、 c はスリットの半長、 N_{IH} 、 N_{IIH} はヘルツの接触幅を考慮したモードIおよびモードIIの

無次元応力拡大係数で, それぞれ次式により表される。

$$N_{IH}, N_{II} = N_{IP}, N_{II} \frac{\{1 - (b/R)^2\}}{\delta_{I, II}} \quad (3)$$

N_{IP}, N_{II} はスリットの傾きが θ の場合のモード I およびモード II の応力拡大係数である。なお, 本実験のスリット寸法比 c/R が 0.3 なる場合のモード I の応力拡大係数は $N_{IP} = 1.136$ であり, 純モード II の応力拡大係数は $N_{II} = 1.866$ ($\theta = 27.2^\circ$) である。 $\delta_{I, II}$ はスリット寸法比 (c/R) と接触幅比 (b/R) の関数である。

3. 実験結果および考察

Table 1 は本研究のコンクリート材について得られた機械的性質ならびに破壊靱性の実験結果を一括して示したものである。従来より知られている傾向^(9,10)と同様, 水セメント比 W/C が大なる材料ほど機械的強度が低く, モード I および II の破壊靱性値も低い値を示している。しかし, 従来なされたコンクリートに対するモード II の破壊靱性の測定例は非常に少ない⁽¹¹⁾。

Table 1 Mean mechanical properties of concrete.

W/C*	0.25				0.60			
	2.5	5	10	25	2.5	5	10	25
Maximum grain size G_{max} (mm)	2.5	5	10	25	2.5	5	10	25
Apparent density γ (g/cm ³)	2.30	2.31	2.39	2.41	2.15	2.10	2.27	2.26
Young's modulus E (GPa)	32.2	32.7	36.9	37.1	21.6	22.0	27.0	27.3
Compressive strength σ_c (MPa)	73.4 n 3 Sd 7.926	81.1 3 3 2.573	83.0 3 3 1.728	65.3 3 3 0.858	32.3 3 3 2.302	32.1 3 3 1.013	31.0 3 3 0.893	25.4 3 3 1.009
Diametral compressive strength σ_{Ht} (MPa)	5.74 n 4 Sd 0.455	7.22 4 4 0.100	6.06 4 4 0.154	5.10 4 4 0.284	3.22 3 4 0.411	3.30 4 3 0.068	3.44 3 3 0.167	2.61 3 4 0.254
Mode I fracture toughness K_{Ic} (MPa · m ^{1/2})	0.849 n 4 Sd 0.069	0.891 4 4 0.025	0.880 3 3 0.032	0.821 3 3 0.045	0.376 4 4 0.019	0.496 3 3 0.036	0.468 3 3 0.030	0.441 4 4 0.011
Mode II fracture toughness K_{IIc} (MPa · m ^{1/2})	1.22 n 3 Sd 0.069	1.29 3 3 0.077	1.37 3 3 0.131	1.30 3 3 0.134	0.759 3 3 0.019	0.742 3 3 0.042	0.783 3 3 0.032	0.767 3 3 0.018
Ratio of fracture toughness K_{IIc}/K_{Ic}	1.44	1.45	1.56	1.58	2.02	1.49	1.67	1.74

*: Water reducing agent is used 1.5 and 0.6 % for W/C=0.25 and 0.60, respectively.
n: Number of specimen Sd: Standard deviation

3.1 骨材の最大寸法および水セメント比の及ぼす影響

3.1.1 圧縮強度および圧裂引張強度

Fig. 2 は圧縮強度 σ_c と水セメント比 W/C を骨材の最大寸法 G_{max} 毎に片対数のグラフに示したものである。本実験において W/C は 0.25 および 0.60 の 2 種類のデータでしかないが, 先に本研究室において測定し

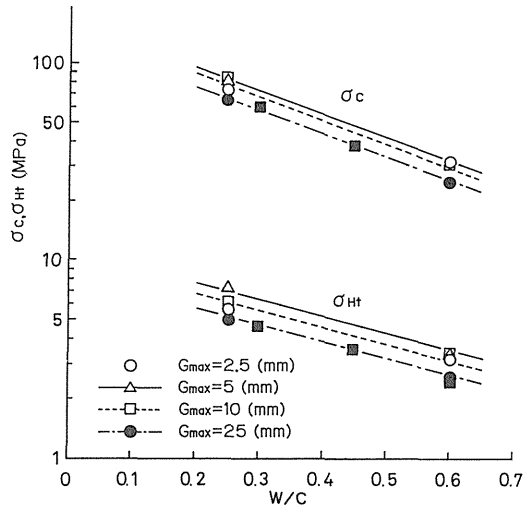


Fig. 2 Relations between compressive strength σ_c and diametral compressive strength σ_{Ht} and ratio of water and cement W/C .

た黒の四角形で示した $W/C = 0.30, 0.45$ および 0.60 の 3 種類の実験データ⁽³⁾が以下のような関係式でよく表現することができたので, 本実験において得られたデータも同様な関係式で整理し, その指数 n を調べた。

$$\sigma = \sigma_1 \exp \{-n(W/C)\} \quad (4)$$

上式より各 G_{max} 毎に n 値を求め, その値を平均することにより本実験に用いたコンクリートの W/C に対する係数 σ_1 および n を定めた。図により明らかなように σ_c および σ_{Ht} は W/C が大なるものほど低くなる。

次に Fig. 3 に示した σ_c および σ_{Ht} と G_{max} の関係は次式のように表した。

$$\sigma = \sigma_2 G_{max}^{-m} \quad (5)$$

そして, 各 W/C 毎に求められた m の値を同様に平均して圧縮および圧裂引張強度に対する G_{max} の係数 σ_2 および m とした。図により多少のばらつきはあるものの G_{max} が大きくなると σ_c および σ_{Ht} は若干低くなる。しかし, $G_{max} = 2.5$ mm の値は全体的に見てこれより大きな G_{max} をもつ 3 種類のものの傾向からずれている。これは $G_{max} = 2.5$ mm の試料がむしろモルタルに属すると見なされ, 他の 3 種類と単純に比較し得ないためであろうと考えられる。従って, 以下に述べる関係式はコンクリートに関するものとして $G_{max} = 2.5$ mm のデータを除くこととする。そして, これらの機械的強度

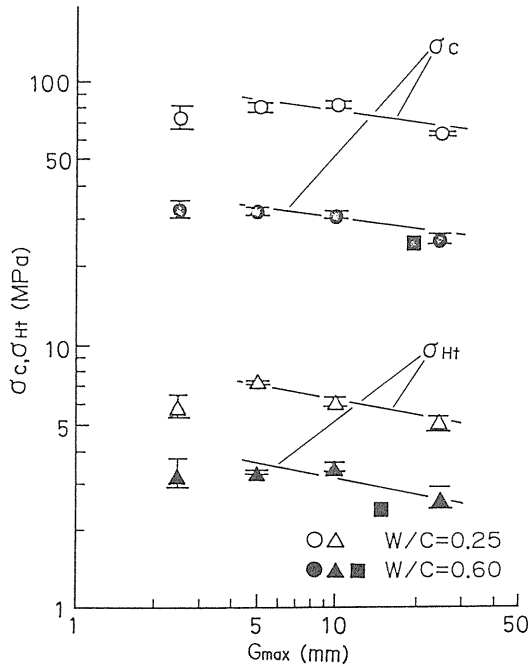


Fig. 3 Relations between compressive strength σ_c and diametral compressive strength σ_{Ht} and maximum grain size G_{max} .

を先に述べた2つの要因を考慮して次式の形にまとめることとした。

$$\sigma = \sigma_0 G_{max}^{-m} \exp \{-n(W/C)\} \quad (6)$$

上式はセラミックス等に使用されたKnudsen⁽¹²⁾の式と類似な形である。上式により本実験より得られた圧縮および圧裂引張強度のデータを整理すると次式のようなになる。

$$\sigma_c = 212 G_{max}^{-0.146} \exp \{-2.72(W/C)\} \text{ (MPa)} \quad (7)$$

$$\sigma_{Ht} = 15.2 G_{max}^{-0.184} \exp \{-1.92(W/C)\} \text{ (MPa)} \quad (8)$$

Fig. 2 および 3 の直線はこれらの関係式を示したものである。これらの図より本実験において得られた関係式は前に行ったデータを含めよく満足することが分かる。

3.1.2 モード I およびモード II の破壊靱性値

モード I およびモード II の破壊靱性値においても上述と同様な関係式を用いてデータを整理すると以下のように表せる。

$$K_{Ic} = 1.55 G_{max}^{-0.063} \exp \{-1.75(W/C)\} \text{ (MPa} \cdot \text{m}^{1/2}) \quad (9)$$

$$K_{IIc} = 1.91 G_{max}^{0.011} \exp \{-1.57(W/C)\} \text{ (MPa} \cdot \text{m}^{1/2}) \quad (10)$$

Fig. 4 および 5 は K_{Ic} , K_{IIc} をそれぞれ骨材の最大寸法および水セメント比の関係を表したもので、図中の直線は上式を用いて引いたものである。モード I の破壊

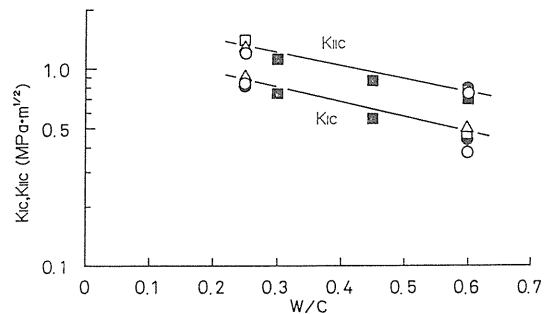


Fig. 4 Relations between mode I and mode II fracture toughnesses K_{Ic} , K_{IIc} and ratio of water and cement W/C .

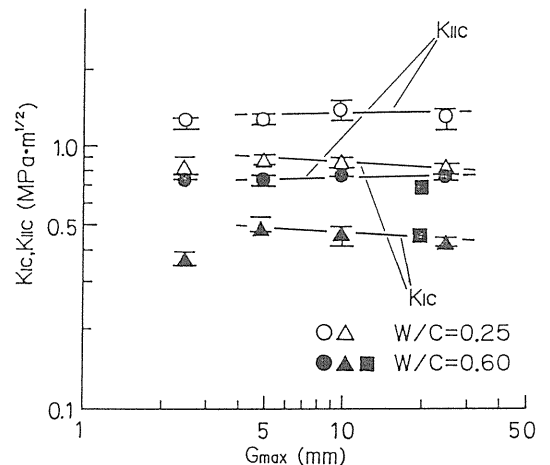


Fig. 5 Relations between mode I and mode II fracture toughnesses K_{Ic} , K_{IIc} and maximum grain size G_{max} .

靱性値においても圧裂引張強度と同様に $G_{max} = 2.5$ mm のデータは $G_{max} = 5$ mm 以上のデータの傾向からずれている。従って、 K_{Ic} においてもモルタルとコンク

リートを区別する必要がある。特に $W/C=0.60$ のデータにおいてその影響が顕著に現れている。モードIIの破壊靱性値における G_{max} の係数は他のものと異なり僅かながら正であり、 G_{max} が大きくなるほど K_{IC} は大きくなる。そのため、 $G_{max}=2.5\text{mm}$ の実験値もコンクリートに対して求めた関係式でも満足される。しかし、巨視的に見れば G_{max} の K_{IC} および K_{IIC} に及ぼす影響は本来非常に小さく、 σ_c や σ_{HI} の指数に比較しおよそ1桁小さい。また、Fig. 4 および 5 の K_{IC} と K_{IIC} の傾斜はほとんど変わらず、コンクリートの K_{IC} と K_{IIC} の比率はほぼ1.4~2.0の間にありほとんど定数と考えてよいようである。これはコンクリートの単軸引張強度と純粋せん断強度の比率が一定であることを意味する。

3.2 圧縮および圧裂引張強度とAE

Fig. 6 は一例として $W/C=0.60$, $G_{max}=25\text{mm}$ の圧縮試験において発生したAEの記録である。この図にお

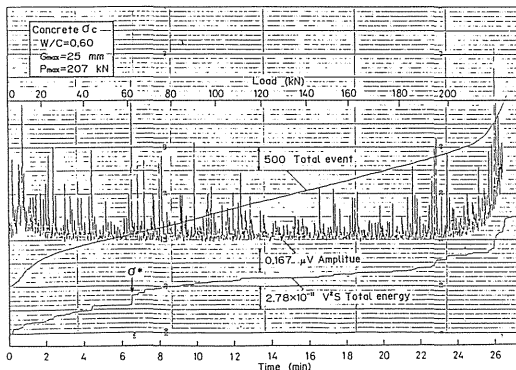


Fig. 6 Acoustic emission responses of concrete in the compressive strength testing.

いて測定を始めてすぐのAE振幅、トータル・イベント数およびトータル・エネルギーの急激な増加は球面座と試験片との接触開始と考えられる。Fig. 6においてこの接触による初期のAE急増がおさまった後の中期でAEに変化が現れる応力 σ^* は最終破壊応力 σ_{max} に対する単純比率が約0.29であり、ここでトータル・エネルギーにかなりの増加が現れる。その後、ほぼ単調に増加したのち、ふたたび単純比率が約0.93の終期で急激に増加し、最終破壊に至る。このような中期のAE変化点は欠陥からき裂が発生し始めたためと考えられる。

また、Fig. 7は $W/C=0.60$, $G_{max}=25\text{mm}$ の圧裂引張強度において発生したAEの記録を示す。Fig 7にお

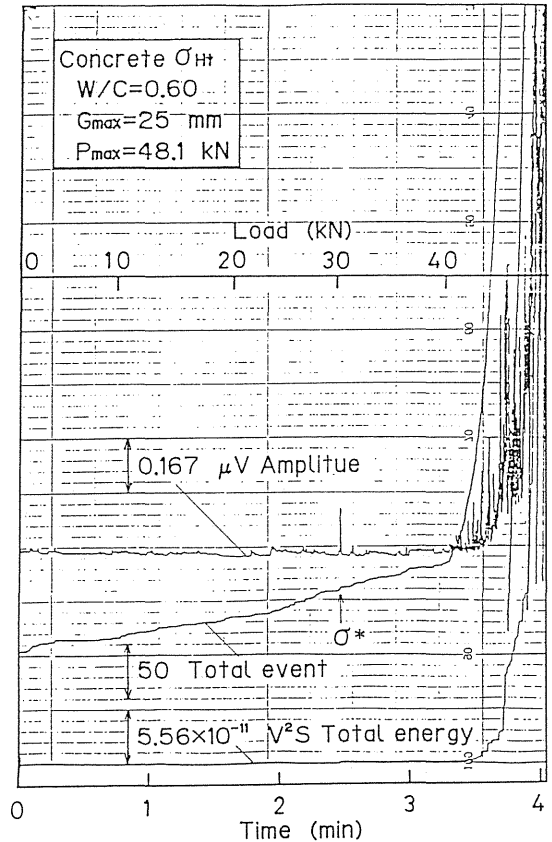


Fig. 7 Acoustic emission responses of concrete in the diametral compressive strength testing.

いてAE振幅に注目すると σ^* は中期の $0.63\sigma_{HI}$ の応力で一度突発的に増加し、また、それまでと同程度の振幅にもどった後、再び $0.85\sigma_{HI}$ から急増してそのまま最終破壊に至る。これにほぼ対応する比率でトータル・イベント数およびトータル・エネルギーも急激に増加している。よって、この中期に示される突発的な増加が直接的に破壊に関連したと考えられる。これらの傾向はコンクリートの G_{max} に関係なく他の配合にも現れた。 W/C に対しては同じ骨材寸法の場合、 σ^* は $0.77\sigma_{HI}$ および $0.98\sigma_{HI}$ となっており、 $W/C=0.25$ より $W/C=0.60$ の方が若干低応力でAEを検出できるようである。

3.3 モード I およびモード II の破壊靱性値と AE

Fig. 8 および 9 は $W/C=0.25$, $G_{max}=5$ mm の場合のそれぞれモード I およびモード II 破壊靱性試験において発生した AE の記録を示す。これらの図においても

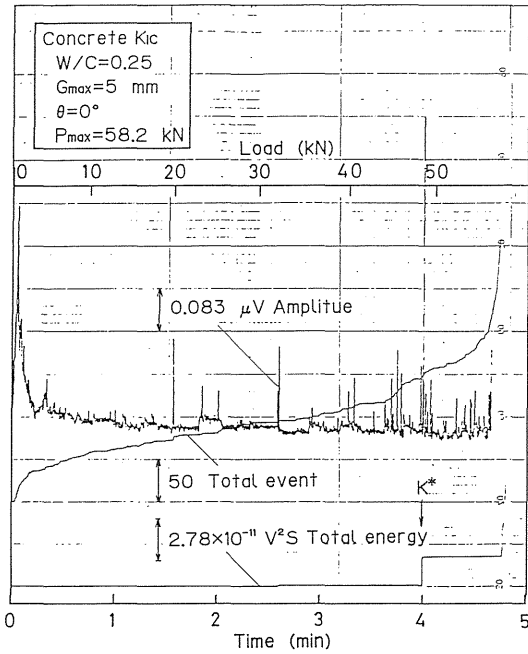


Fig. 8 Acoustic emission responses of concrete in the mode I fracture toughness testing.

負荷の初期に AE 振幅およびトータル・イベント数の増加が見られるが、これらは試験片の表面の微小な凹凸が平面圧子によりつぶれることにより AE が発生したためと考えられる。これらの図において特にトータル・エネルギーに注目し、直接的に破壊に関連したと考えられる中期の急増点を K^* とする。この K^* 点応力の σ_{max} に対する単純比率はモード I の破壊靱性試験の場合、0.83、またモード II の破壊靱性試験の場合、0.73 となっている。これらの比は、ばらつきはあるものの他の場合においてもあまり変化がない。よって、破壊靱性試験においてき裂は σ_{max} のおよそ 80% 程度でスリット先端の応力集中部においてある程度塑性域が形成され伝播を開始したと考えられる。

3.4 圧縮が支配的な応力場における破壊基準とその AE

Fig.10 は一例として $W/C=0.60$ のコンクリートの

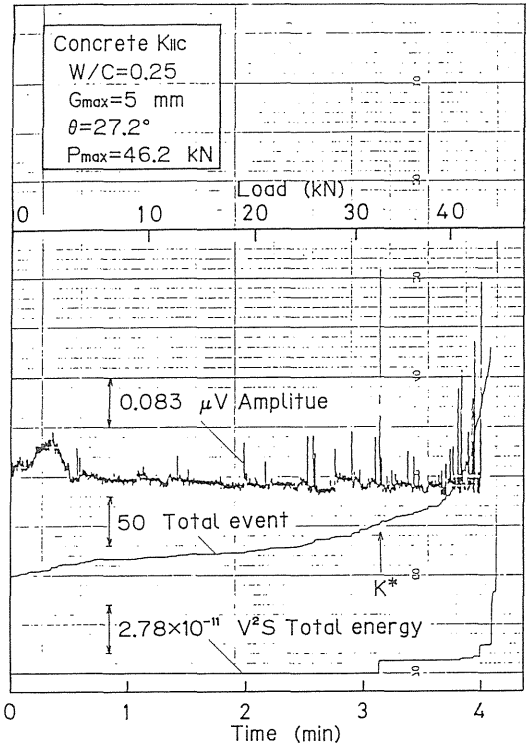


Fig. 9 Acoustic emission responses of concrete in the mode II fracture toughness testing.

引張り-圧縮の二軸応力場における破壊基準線図を示す。図において線 [1], [2] および [3] は佐藤らの脆性材料の多軸応力場の破壊基準⁽¹³⁾におけるそれぞれの破壊の条件が引張応力が支配的な応力場(モード I 型破壊)、圧縮応力が支配的な応力場(モード II 型破壊およびき裂の拘束)および最大せん断応力説に対応する。圧縮強度試験はもちろん、圧裂引張強度試験も圧縮応力が支配的な応力場であるが、本研究には試料としてコンクリートを用いたため σ_{Ht} において以下のようなことに注意しなければならない。本研究の圧裂引張強度試験に用いられた円板形の試験片の中心での圧縮応力 σ_y と引張応力 σ_x の比 k は以下のような接触幅 (b/R) の関数である^(6,7)。

$$k = -\sigma_y / \sigma_x = 3 + 0.1973(b/R) + 0.6217(b/R)^2 + 2.788(b/R)^3 \quad (11)$$

ここで Fig.10 の $W/C=0.60$, $G_{max}=25$ mm のコンクリートの例において圧縮および引張りの応力比は 3.10 である。従って、このような円板形試験片中心の応力場

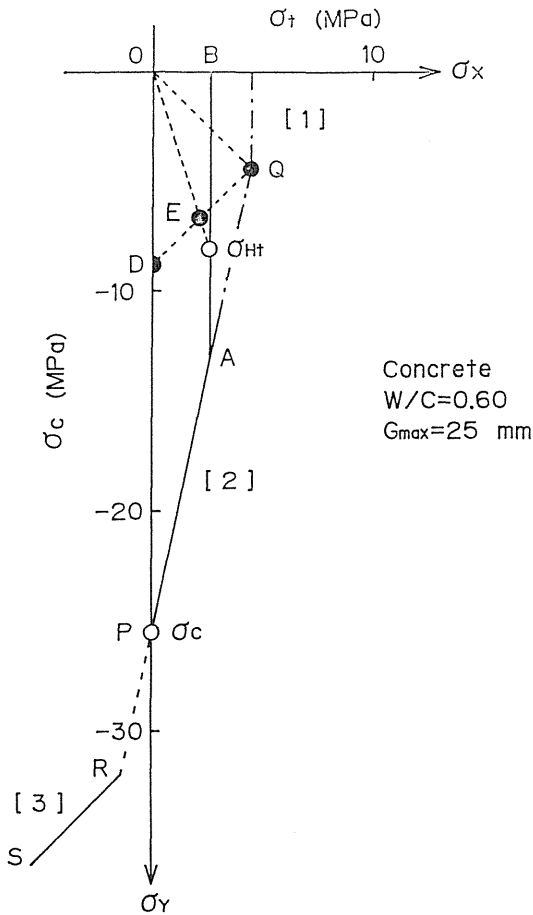


Fig. 10 Fracture criteria of concrete under multiaxial stresses. (tension-compression)

は圧縮応力が支配的であると考えられる。しかし、コンクリートのような圧縮強度が引張強度の通常10倍程度もある材料では上述の円板形試験片の中心での応力比を十分上回ってしまう。それゆえ圧裂引張強度試験での破壊は圧縮応力が支配的であるにもかかわらず現象的にはモードI型の破壊を起こしてしまうと考えられる。従来、圧裂引張強度試験によって求めたコンクリートの引張強度は引張強さ係数または割裂引張強度などと呼ばれていたが、JIS A 1113⁽¹⁴⁾で、特に両者を区別する必要のない限り単に引張強度と呼ぶことにしたのはこの理由からであると考えられる。よって、Fig. 10では圧裂引張強度を単軸引張強度と等しくすることによって破壊基準線図を描いた。

圧縮応力が支配的な応力場のき裂伝播開始はせん断

応力によってFig.10の純粋せん断強度の点Qを通る45°の直線と縦軸の交点Dを結ぶ破壊DQ上で生じ、破壊力学的に見てモードII型のき裂発生開始が起こる。この破壊DQは次式で表される。

$$\sigma_y = \sigma_x - 2\sigma_t \frac{K_{IIc}}{K_{Ic}} \quad (12)$$

しかし、圧縮応力が支配的な応力場ではモードII型のき裂発生開始がそのまま最終破壊にならず、圧縮応力によるき裂の拘束効果によるせん断応力の増分が加わり、直線AP上で最終破壊に至る。直線APは圧縮強度の点PとQを結ぶ直線として次式で表される。

$$\sigma_y = \left\{ \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \left(\frac{K_{Ic}}{K_{IIc}} \right) - 1 \right\} \sigma_x - \sigma_c \quad (13)$$

上式は見掛けの引張強度を導入した修正Coulomb-Mohr基準^(15,16)に傾向的に類似しているが、破壊力学的根拠が明瞭である。この2つの線で囲まれた三角領域DQPがき裂の拘束領域であると考えられる。直線APは内圧強度試験などの二軸応力場の破壊実験から推定できる。しかし、破壊DQ上では潜在的で外見の観察は困難であるが、AE法によりこの線上のき裂の伝播開始に対応する現象が検出可能と考えられる。

Fig.10において、単軸圧縮強度試験におけるき裂伝播の開始点Dの応力を σ_D とすると、 σ_c に対する比率は次式で計算される。

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_c} = \frac{2\sigma_t}{\sigma_c} \cdot \frac{K_{IIc}}{K_{Ic}} \quad (14)$$

ここで σ_t は前述のように σ_{Ht} から推定できる。

Table 2は各試験に対する σ_D と σ_c の比およびAEの変化点と σ_c の比を表した。表よりAEの変化点に対応する実験値と破壊基準線図から算出されるき裂伝播開

Table 2 Percentages of load for fracture values corresponding to inflection points of AE and deduced points of fracture initiation of concrete under compression.

W/C	0.25				0.60				
	G _{max} (mm)	2.5	5	10	25	2.5	5	10	25
Deduced Points σ_D/σ_c		22	26	23	25	40	31	36	36
Inflection points of AE σ^*/σ_c		20	33	-	25	31	26	-	29

Data indicate all in (%) for the fracture values.

始点は数%の差は生じているものの比較的よく一致している。また、圧裂引張強度においてもき裂伝播の開始は破線QD線上の点Eとみられる。点Eと圧裂引張強度 σ_{HI} の比は次式で計算される。

$$\frac{\sigma_E}{\sigma_{HI}} = \frac{2}{1+k} \left(\frac{K_{IIc}}{K_{Ic}} \right) \quad (15)$$

Fig. 7 の圧裂引張強度試験の場合 $\sigma_E/\sigma_{HI}=0.85$ である。この値はAEの変化点 $\sigma^*(=0.63\sigma_{HI})$ よりも大きい。終期のAE変化点によく一致する。このようなAEの急増点の存在はここに提出する破壊基準についてひとつの潜在的な検証を与えるものと考えられる。

4. 結 論

以上、本研究において2種類の水セメント比と異なる4種類の骨材の最大寸法をもつコンクリートについて各種の破壊試験を行い、さらに、その破壊試験の過程において発生するAEの検討を行い以下の結論を得た。

水セメント比および骨材の最大寸法に対する圧縮強度、圧裂引張強度、モードIおよびモードIIの破壊靱性値への影響を次式で整理することにした。しかし、 $G_{max}=2.5mm$ のデータはモルタルに属すると考えられコンクリートと区別するため除外した。

$$S=S_0 \cdot G_{max}^{-m} \exp \{-n(W/C)\}$$

この関係式から本研究に用いたコンクリートにおいて水セメント比は機械的強度および破壊靱性値の双方にかなり影響を及ぼすことが明確となった。しかし、骨材の最大寸法に対しては圧縮強度や圧裂引張強度などの機械的強度には多少影響を及ぼすものの、破壊靱性値に対しては巨視的に見て影響が小さい。破壊靱性試験においてき裂は最大荷重の80%程度で伝播する事および水セメント比また粒径に関係して $K_{IIc}/K_{Ic} \approx 1.4 \sim 2.0$ である事が確認できた。

また、コンクリートにおいて圧縮が支配的な応力場における破壊基準線図を単軸引張強度が圧裂引張強度と等しいと仮定することにより提示した。そしてAEに

よって圧縮が支配的な応力場におけるコンクリートの破壊の基礎となるせん断き裂の発生開始がAEの変化点応力に対応し、圧縮によるき裂の拘束過程を経て最終破壊に至ることを論じた。

参 考 文 献

- 1) B. Helmut, et al., J. Eng. Mech. Div., ASCE, 99 (1975), 853.
- 2) F. H. Wittmann (Ed.) Fracture Mechanics of Concrete, Development in Civil Engineering, Elsevier, 7 (1983), 680.
- 3) 佐藤・車田・福沢・沼尾・小野瀬・深谷, 茨城大学工学部研究集報, 第35巻(1987), 123.
- 4) 児玉武三, セメント技術年報, 23 (1969).
- 5) 十代田知三, コンクリート・ジャーナル, 10-10 (1972), 1.
- 6) 淡路・佐藤, 材料, 27-295(1978), 362, 342, 349.
- 7) H. Awaji and S. Sato, J. Eng. Materials and Tech, ASME-H, 101 (1979), 139.
- 8) H. Awaji and S. Sato, J. Eng. Materials and Tech., ASME-H, 100 (1978), 175.
- 9) 岩崎, 他, フレッシュコンクリート・硬化コンクリート・技報堂, (1981), 60.
- 10) 伊藤茂富, コンクリート工学, 森北出版, (1972), 73.
- 11) 和泉・三橋・野村, 日本建築学会構造系論文報告集, 360(1986), 17.
- 12) F. P. Kundsén, J. Am. Cerm.Soc., 42 (1959), 376.
- 13) 佐藤・淡路・川又・車田・奥, 日本原子力学会誌, 28-12(1986), 1172.
- 14) JIS A 1113コンクリートの引張強度試験方法, (1976), 1.
- 15) S. Sato, H. Awaji, K. Kawamata, A. Kurumada and T. Oku, Nuclear Eng. and Design, 103 (1987), 291.
- 16) W. Weibull, J. Appl. Mech. ASME, 18 (1951), 293.