

コンクリートの破壊靱性

佐藤千之助^{*}, 車田 亮^{*}, 福沢公夫^{**}, 沼尾達弥^{**}, 小野瀬健太郎^{***}, 深谷勝章^{****}

(昭和62年8月31日受理)

Fracture toughness of concrete

Sennosuke SATO^{*}, Akira KURUMADA^{*}, Kimio FUKUZAWA^{**}
Tatsuya NUMAO^{**}, Kentaro ONOSE^{***} and Katsuaki FUKAYA^{****}

Abstract — This paper deals with fracture toughness measurements of mode I, mode II and their combined modes for three kinds of water/cement ratio (W/C) of concrete. During these fracture processes acoustic emissions (AE) are detected and used for verifications of latent phenomena of the crack initiation, restriction in the fracture criteria of concrete. Obtained results are expressed as functions of W/C, elastic modulus and AE inelastic strain coefficient, which is deduced from the measurements of nonl-near component in the stress-strain curve and number of AE total event during the compressive test of concrete.

1. はじめに

コンクリート構造物の巨大化, 複雑化にともなう多軸応力場の破壊力学的な設計基準の確立の要求から, 近年コンクリートの破壊基準についての多くの研究が行われている⁽¹⁾。それらの多くは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モードI型破壊について論じている⁽²⁾。しかし, 実際上コンクリートやモルタル等の構造物材は主として圧縮応力場において実用されていることを考慮すると, 圧縮応力が支配的な多軸応力場における破壊あるいはモードIおよびII型のその混合モード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。

本研究は水セメント比の異なる3種類のコンクリートについて圧縮, 圧裂強度, モードIおよびIIとその混合モードの破壊靱性など一連の破壊力学的性質の検討を行い, コンクリートの破壊性状の検討を行ったものである。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。また単軸圧縮試験については応力-ひずみを計測し, 弾性係数, 非弾性ひずみ, 微視欠陥からき裂の発生に伴って放出されるAEの累積量および水セメント比と上記破壊強度との関連の検討を行った。

*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

***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

****日立製作所(株)機械研究所 (土浦市神立町)

Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Tsuchiura 300, 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としては、水セメント比 W/C は0.3, 0.45 および0.6, セメントは普通ポルトランドセメント, 細骨材は川砂また粗骨材は川砂利を使用した。本研究に用いた材料試験の試料寸法は圧縮試験で $\phi 100 \times 200$ mm, 円弧型圧子による円板の圧裂試験で $\phi 150 \times 80$ mm, 中心スリット(長さ $2c = 45$ mm)を有する円板の圧裂による破壊靱性試験で $\phi 150 \times 80$ mm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^(3,4)。従って本実験においてこの影響を軽減するため、縦打ち型の圧裂および破壊靱性試験に対応させるため圧縮試験片は横打ち型を用いて作製した。なお破壊靱性用円板試験片の中心スリットの作製は剥離剤を塗布し両端部を鋭くしたステンレス鋼板(幅45 mm, 厚さ0.3 mm)を予め型わくに固定して打込み後48時間で静かに引抜きスリットとし、28日間水中養生して実験に共した。

2.2 実験装置

材料試験機は50 ton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、試料と試験機間に厚さ3 mm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)製のAE200 システムを使用した。AE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200 kHz, 増幅度はプリアンプ40 dB, メインアンプ50 dB。バンドパスフィルタ周波数帯域は10 kHz~2 MHz, しきい値電圧は $5 \mu V$ 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。また圧縮試験についてはひずみゲージ(ゲージ長さ60 mm)を用い応力-ひずみを測定し, これらAE諸量との対応も検討した。

2.3 実験方法

2.3.1 圧縮試験

圧縮強度 σ_c は円柱側面に一部平坦部(幅20 mm)を設けた試験片を用い, 下端に球面座を介して均一に圧縮して求めた。AEの測定はAE変換子をC型クランプにより試験片平坦部の中央にグリースをつけて密着させて行った。

2.3.2 圧裂強度試験

円板の直径方向圧縮による圧裂強度 σ_{Ht} は鋼製の円弧型圧子を用い, ヘルツの接触幅 $2b$ の圧力分布を考慮した淡路と佐藤の開発した方法^(5,6)により測定した。なお, 本研究における $2b$ は圧感紙により測定された。圧裂強度 σ_{Ht} は次式で求められる。

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

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 $P/(\pi Rh)$ である。荷重軸方向の圧縮応力 σ_c も b/R の関数で表される。なお, 本研究に用いた円弧型圧子の内半径90 mmで試料円板に対する比は1.20であった。

2.3.3 破壊靱性試験

破壊靱性値は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 を変えることによりモードIおよびIIの破壊靱性値 K_{Ic} , K_{IIc} およびこれらの混合モードの破壊靱性値を求める方法^(7,8)により求めた。

$$K_{I, II} = N_{IH, IIS} \cdot \sigma_P \cdot (\pi c)^{1/2} \quad (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}) \quad (2)$$

ここで $\sigma_P = P/(\pi Rh)$, c はスリットの半長, N_{IH} および N_{IIS} はヘルツの接触圧を考慮したモードIおよび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。

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

N_{IP} および N_{IIS} はスリットの傾きが θ の場合の集中荷重によるモードIおよびIIの応力拡大係数である。また δ_I および δ_{II} はスリット寸法比(c/R)と接触幅比(b/R)の関数である。なお, 本研究の試験片の厚さは後述の実験の荷重-変位線図からみて十分小規模降伏状態とみなすことができ平面ひずみ破壊靱性の有効性⁽⁹⁾を満足する。

3. 実験結果および考察

Table 1は本実験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平均値, 試験数および変動係数を示したものである。従来知られている傾向^(10, 11)と同様, W/C が大なる材料ほど機械的強度も破壊靱性値も低い値を示している。

Table 1 Experimental results of concrete tested.

W/C		0.3	0.45	0.6
Apparent density γ (g/cm ³)		2.40	2.33	2.34
Young's modulus E (GPa)		34.4	27.6	24.0
Compressive strength σ_c (MPa)	$\bar{\sigma}_c$	59.7	37.9	25.3
	$\frac{n}{C_v}$	0.0257	0.0304	0.0434
Diametral compressive strength σ_{Ht} (MPa)	$\bar{\sigma}_{Ht}$	4.64	3.54	2.45
	$\frac{n}{C_v}$	0.0960	0.122	0.0335
Mode I fracture tough. K_{IC} (MPa·m ^{1/2})	\bar{K}_{IC}	0.742	0.554	0.465
	$\frac{n}{C_v}$	0.0428	0.0878	0.0968
Mode II fracture tough. K_{IIc} (MPa·m ^{1/2})	\bar{K}_{IIc}	1.120	0.865	0.703
	$\frac{n}{C_v}$	0.0334	0.0659	0.0614
Ratio of fracture tough. K_{IIc}/K_{IC}		1.51	1.56	1.51

3.1 圧縮強度および圧裂強度

Fig. 1 および 2 は一例として $W/C=0.45$ の圧縮および圧裂試験において発生した AE の記録である。まず Fig. 1 において圧縮試験の際に発生した AE をみると、AE 振幅は 50~90kN (0.17~0.3 σ_c) の低荷重から 0.03~0.05 μV 程度の微弱ながら連続的な AE の発生が開始

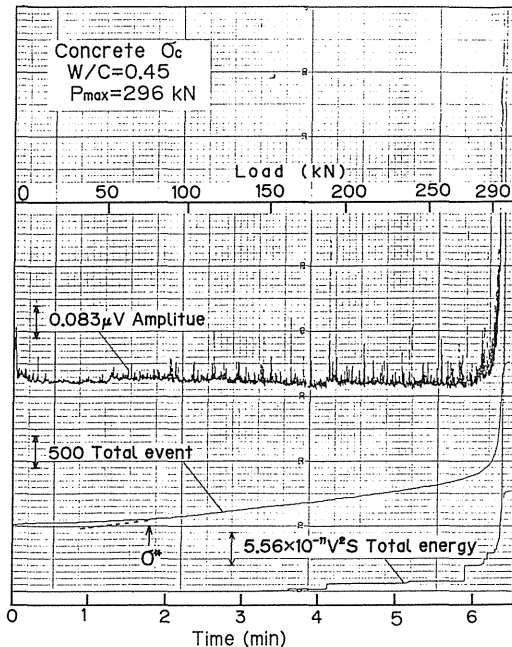


Fig. 1 Acoustic emission responses of concrete in the compressive strength testing. ($W/C=0.45$)

する。90kNを超えると 0.10 μV 以上の突発的な AE が発生し始め、明らかに欠陥からき裂が進展していることを示す。このような荷重に対応する応力をき裂の発生開始点 σ^* と記号づける。トータル・イベント数は約 80kN (0.27 σ_c) から僅かながら傾斜が変わり、約 2.7/kN 一定の上昇を開始している。またトータル・エネルギーは 163kN (0.55 σ_c) から検出されている。なおこれはトータル・エネルギーの最小測定単位が本 AE 装置の場合、 $10^{-3} V^2 \cdot S$ であり、低荷重で発生したそれ以下の信号については計数されないためと考えられる。従ってこの場合、トータル・エネルギーは低荷重の詳細なき裂の挙動を必ずしも表現していない。

次に Fig. 2 の圧裂試験の際に発生した AE においては、AE 振幅では約 35kN (0.57 σ_{Ht}) から突発的な AE が発生開始している。またトータル・イベント数は 41kN (0.67 σ_{Ht}) から約 3.1/kN の上昇率で急増し、トータル・エネルギーは約 46kN (0.75 σ_{Ht}) から検出開始されている。このような圧縮および圧裂試験における AE の急増ならびに発生開始点応力 σ^* は圧縮が支配的な応力場におけるせん断き裂の発生開始応力に対応するものと考えられる。

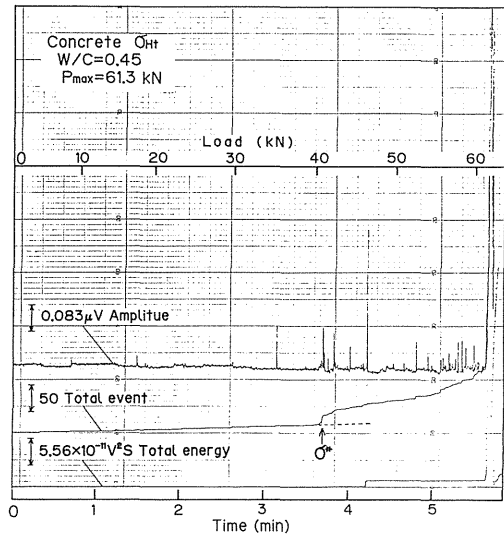


Fig. 2 Acoustic emission responses of concrete in the diametral compressive strength testing. ($W/C=0.45$)

3.2 モード I, II および混合モード破壊靱性

Table 1 に示したようにコンクリートのモード I およ

びIIの破壊靱性値はW/Cが高い材料ほど低い値を示す。K_{IIc}/K_{IC}の値はW/Cに無関係に1.51~1.56となっている。和泉, 三橋ら⁽¹²⁾の1.6~1.8なる実験結果と比較し幾分低く, 淡路および佐藤らによる黒鉛, 岩石, レジンモルタル等の脆性材料の1.1~1.3前後のデータ^(13,14,15)と比較しかなり高い。本研究においてはコンクリート円板に中心スリットを作製する際, ステンレス鋼板により粗骨材分布に制限を加えた影響が懸念される。すなわち, スリットの開口型のK_{IC}に対しては粗骨材の存在の影響が比較的少なく低目の値を与え, スリットの面内せん断型のK_{IIc}に対しては逆に幾分高めの値を与える傾向があると考えられる。なお, このK_{IIc}/K_{IC}は破壊力学的にみてコンクリートの純せん断強度と単軸引張強度の比率であることを意味する。従来コンクリートのせん断強度を引張強度と圧縮強度から推定する試みが多くなされているが,^(10,16)いずれも本研究の比率より高い値を与えている。

Fig. 3は各水セメント比のモードIおよびIIの混合モード破壊靱性試験の結果を示したものである。これによると混合モード破壊の条件にW/Cはほとんど影響していない。また, この条件は次式で表される。

$$(K_I/K_{IC})^u + (K_{II}/K_{IIc})^v = 1 \quad (4)$$

本実験で得られたデータはu=1.33, v=1.89の曲線で近似された。この関係は引張が支配的な応力場すなわちK_I/K_{IC}が1の付近では最大主応力説によく近似する。ま

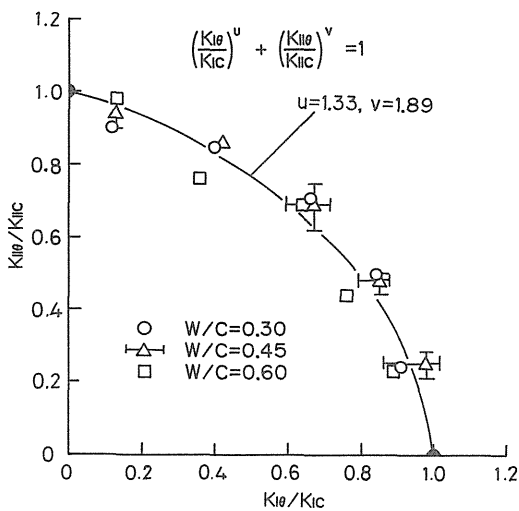


Fig. 3 Fracture criterion in the combined mode of concrete. (W/C=0.3, 0.45 and 0.6)

た, この関係式は脆性材料一般に適用される可能性がある。

Fig. 4は一例としてW/C=0.45の場合のモードII ($\theta=27.2^\circ$) 破壊靱性試験において発生したAEの記録を示す。これによると, 破壊に先立ち, 低荷重から突発的なAE振幅およびそれにほぼ対応するトータル・イベント数の増加を生じていることがわかる。特にこのAEトータル・イベント数に着目し, 直接的に破壊に関連したと考えられる信号の最終急増点をK*と記号つけた場合, このK*点荷重の最終破壊荷重に対する単純比率はモードIおよびIIの破壊靱性試験で0.74, 0.77, 混合モード破壊靱性試験 $\theta=10, 20^\circ$ で0.68となり, 平均およそ0.72前後となっている。以上より最終破壊荷重のおよそ72%でスリット先端の応力集中部において塑性域の形成もしくはき裂の伝播が開始したものと考えられる。なおこの値は多少ばらつきはあるもののW/C=0.3および0.6のコンクリートについてもその比率はほぼ同様である。

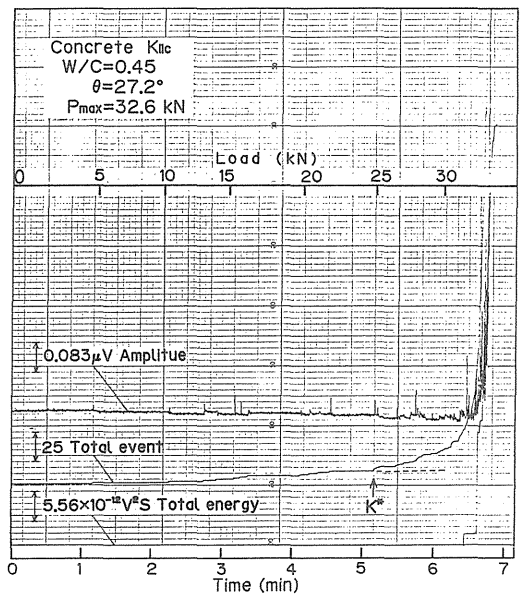


Fig. 4 Acoustic emission responses of concrete in the mode II fracture toughness testing. (W/C=0.45)

3.3 圧縮が支配的な応力場における破壊基準とそのAEによる検証

Fig. 5は一例としてW/C=0.45コンクリートの二軸

応力場における破壊基準図を示す。図において線〔1〕, 〔2〕および〔3〕は佐藤らの破壊基準⁽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。圧縮強度や圧裂強度試験のき裂伝播開始はせん断応力によってFig. 5の基準図のDQ線上で生じ, 破壊力学的にみてモードII型のき裂発生開始が起る。しかし, 圧縮応力が支配的な応力場ではモードII型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, AP線〔2〕で最終破壊に至る。AP線〔2〕はP, Q点が次式で表される。

$$\sigma_y = \left\{ \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \left(\frac{K_{IIc}}{K_{Ic}} \right) - 1 \right\} \sigma_x - \sigma_c \quad (5)$$

ここで σ_t は単軸引張強度である。上式は修正Coulom-Mohr基準^(15,16)に形式上類似しているが, 破壊力学的根拠が明瞭である。この二つの線で囲まれた三角領域DQPがき裂の拘束領域である。AP線〔2〕は内圧強度または圧裂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, DQ線上では潜在的で外見的な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. 5において, 圧縮および圧裂試験におけるき裂伝播の開始点Dおよび点Eの応力をそれぞれ σ_D および σ_E とすると, 圧縮強度 σ_c および圧裂強度 σ_{Ht} に対する比率は次式で計算される。

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_c} = \frac{2 \sigma_t}{\sigma_c} \cdot \frac{K_{IIc}}{K_{Ic}} \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_E}{\sigma_{Ht}} = \frac{2 \sigma_t}{\sigma_{Ht} \{1 - (\sigma_x / \sigma_h)\}} \cdot \frac{K_{IIc}}{K_{Ic}} \quad (7)$$

ここで σ_t は圧裂強度などからも推定できる。また (σ_x / σ_h) は圧裂試験における試験片中央部の圧縮と引張応力の比で, 接触幅により変わる値である。 K_{IIc}/K_{Ic} は1.2前後になることが多い。^(12,13)しかし, 本実験では前述のように $K_{IIc}/K_{Ic} = 1.5$ で幾分大きな値であるため, $\sigma_t/\sigma_{Ht} = 0.804$ となり, 圧縮下の引張強度として理論的に考えにくい結果となった。従ってここでは本実験で得られた推定引張強度によるモードI破壊の条件として線ABの他に粗骨材を含まないレジンモルタル等で行われた実験結果⁽¹⁴⁾をもとに $K_{IIc}/K_{Ic} = 1.2$ と仮定した場合の基準線A'B'も参考に付け加えた。Table 2は圧縮

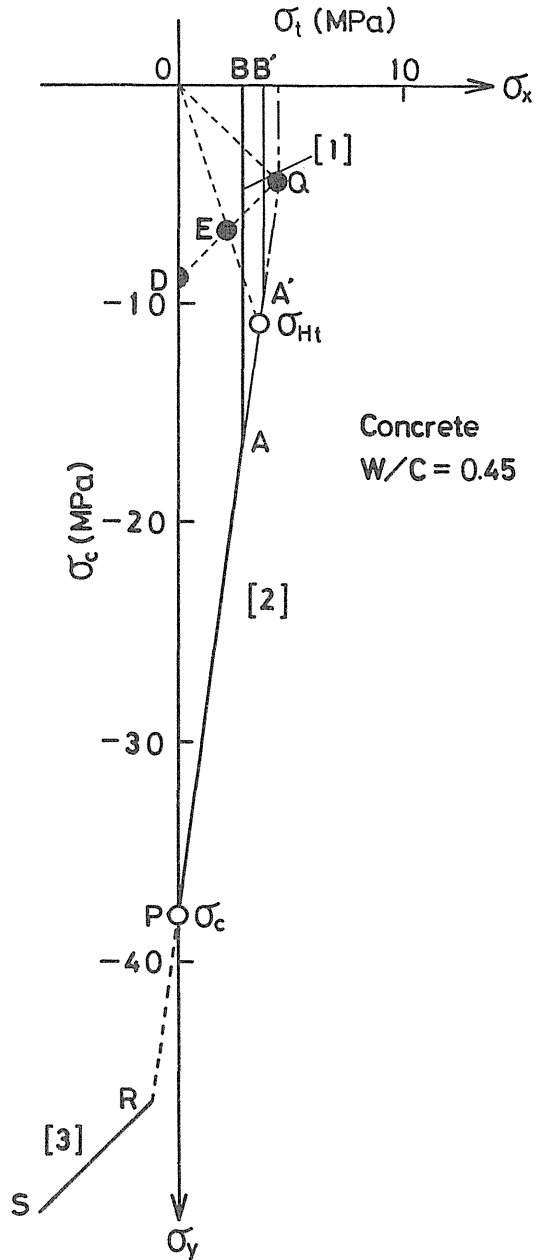


Fig. 5 Fracture criteria of concrete under multi-axial stresses. (W/C = 0.45)

および圧裂試験の際のAEの変化点の平均値および上式から計算したき裂伝播の開始点の比率を示したものである。これらはAEの急増点に対応する実験値と比較するとトータル・エネルギー以外のAE振幅およびトータル・イベント数については数%の差は生じているものの比較

の一致しており、ここに提出する破壊基準について一つの潜在的な検証を与えるものと考えられる。

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

W/C		Inflection points of AE $\sigma^*/\sigma_{c,Ht}$			Deduced points $\sigma_D/\sigma_c, \sigma_E/\sigma_{Ht}$		
		0.3	0.45	0.6	0.3	0.45	0.6
σ_c (MPa)	Amplitude	29	24	32			
	Total event	25	29	30	19	23	24
	Total energy	59	65	51			
σ_{Ht} (MPa)	Amplitude	57	58	-			
	Total event	47	54	59	59	61	62
	Total energy	87	75	-			

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

3.4 AE非弾性ひずみ係数と強度および破壊靱性の関係

コンクリートの圧縮試験における応力-縦ひずみ線図が直線関係の弾性の性質から離脱し非弾性に遷移する応力とAE変化点応力 σ_c^* はほぼ一致している。このような一致は一般にAE発生と密接な関係がある微視破壊の累積の度合が巨視的には非弾性ひずみの増加として現れることが知られていることと対応する。

Fig. 6 水セメント比の異なる3種類のコンクリートの非弾性縦ひずみ ϵ_{1P} とAEのトータル・イベント数 N_{AE} との関係を示す。図より最終破断の直前まで以下の関係が成立することが確認できる。

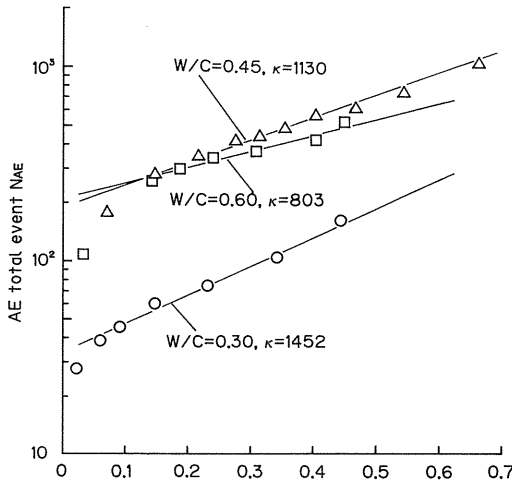


Fig. 6 Relations between AE total event and longitudinal inelastic strain.

$$\log N_{AE} = \kappa \cdot \epsilon_{1P} + C \tag{8}$$

ここに κ と C は試料定数で κ は単位非弾性縦ひずみあたりのトータル・イベント数の増加量の対数を表すパラメータで「AE非弾性ひずみ係数」と定義する。この係数は山ノ内らの非弾性横ひずみに対するAE活性係数⁽¹⁷⁾に類似する。Fig. 7および8は3種類のコンクリートについて、AE非弾性ひずみ係数 κ と縦弾性係数 E 、圧縮強度 σ_c およびモードI, IIの破壊靱性値 K_{Ic} , K_{IIc} の関係を示したものである。この図から κ が増大するに従い圧縮強度ばかりでなく破壊靱性値も直線的に増大しており、互いに次式の関係があることがわかる。

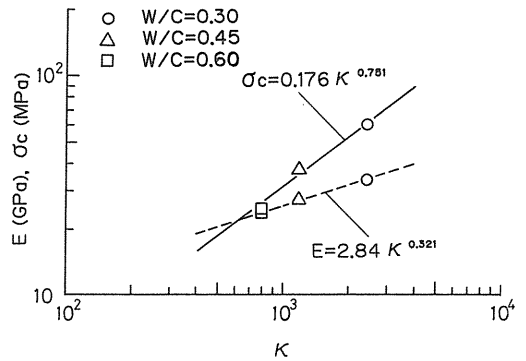


Fig. 7 Relations between elastic modulus E and compressive strength σ_c and AE inelastic strain factor κ .

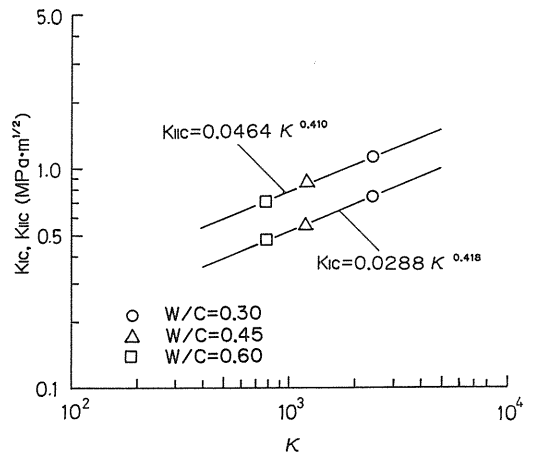


Fig. 8 Relations between mode I, II, fracture toughness K_{Ic} , K_{IIc} and AE inelastic strain factor κ .

$$E = 2.84 \kappa^{0.321} \tag{9}$$

$$\sigma_c = 0.176 \kappa^{0.751} \tag{10}$$

$$K_{IC} = 0.0288 \kappa^{0.418} \tag{11}$$

$$K_{IIC} = 0.0464 \kappa^{0.410} \tag{12}$$

上式から κ が大きく、非弾性変形時に A E が発生し易い材料ほど機械的強度ならびに破壊靱性は増大する。これから κ が大なる材料ほど非線形ひずみ当りのエネルギー解放率が大きで強靱性が大になると結論される。

3.5 弾性係数と強度および破壊靱性の関係

弾性係数 E はコンクリートの圧縮試験における応力-ひずみ線図において最大荷重の 1/3 の点の傾斜から算出した。E はまた共振法、超音波法などにより非破壊的にも測定され、コンクリートの機械的強度特性の検査に広く使用されている。

Fig. 9 は E と σ_c , K_{IC} および K_{IIC} の関係を示したもので、実験範囲でよい直線関係がある。実験式は次式で表せる。

$$\sigma_c = 0.0148E^{2.35} \tag{13}$$

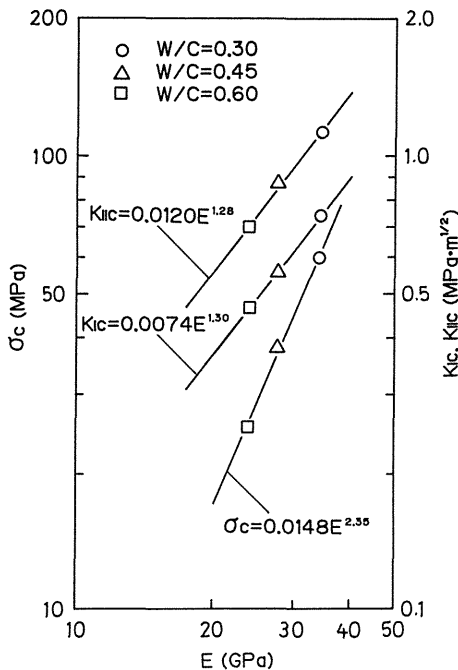


Fig. 9 Relations between compressive strength σ_c , mode I, II fracture toughness K_{IC} , K_{IIC} and elastic modulus E.

$$K_{IC} = 0.0074E^{1.30} \tag{14}$$

$$K_{IIC} = 0.0120E^{1.28} \tag{15}$$

(13式は傾向的に Neville の著書⁽²⁰⁾ のデータに近い。なお、W/C および κ との関係は次式で表される。

$$W/C = -0.820 \log_e E + 3.19 \tag{16}$$

$$\kappa = 0.0396 E^{3.11} \tag{17}$$

3.6 水セメント比と強度および破壊靱性の関係

Fig. 10 および 11 は水セメント比の縦弾性係数、圧縮強度、モード I, II の破壊靱性値および A E 非弾性ひずみ係数におよぼす影響を片対数で表したものでそれらの間により直線性がある。この直線を指数関数として最小自乗法により次式の形に整理する。

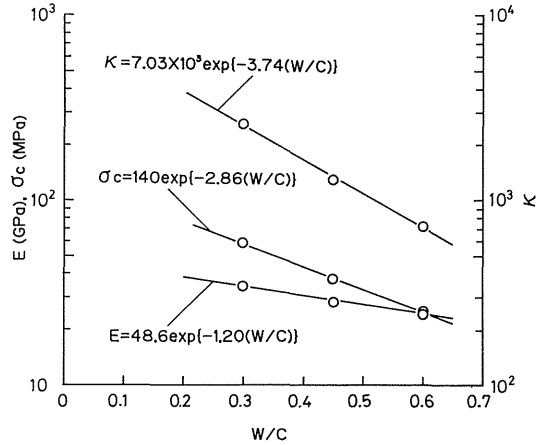


Fig. 10 Relations between elastic modulus E, compressive strength σ_c and ratio of water and cement W/C.

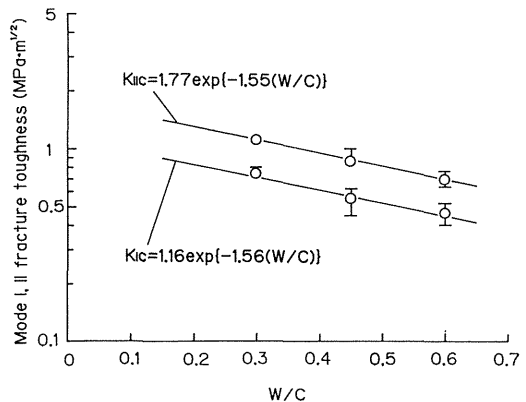


Fig. 11 Relations between mode I, II fracture toughness K_{IC} , K_{IIC} and ratio of water and cement W/C.

$$S = S_0 \exp \{ -n(W/C) \} \quad (18)$$

ここで S_0 および n は各物性の定数で、本研究のコンクリートでは

$$E = 48.6 \exp \{ -1.20(W/C) \} \quad (19)$$

$$\sigma_C = 140 \exp \{ -2.75(W/C) \} \quad (20)$$

$$K_{IC} = 1.16 \exp \{ -1.56(W/C) \} \quad (21)$$

$$K_{IIC} = 1.77 \exp \{ -1.55(W/C) \} \quad (22)$$

また A E 非弾性ひずみ係数では次式で近似される。

$$\kappa = 7.03 \times 10^3 \exp \{ -3.74(W/C) \} \quad (23)$$

これらの式はセラミックスなどの材料強度と気孔率 P に関するよく知られた式^(18, 19)と同じ形式である。それゆえ、 W/C はコンクリートの気孔率にも関連があるものと考えられる。また、この材料強度と気孔率の式は Knudsen⁽²⁰⁾により組織粒度の効果を含めた式に拡張されているが、 S_0 は試験体コンクリートの骨材の粒径にも密接な関連があると推定される。また、その指数 n は気孔の形状や位置に依存する因子であることから、 n が大きくなるに従い W/C が強靱性に及ぼす影響が大なるものと考えられる。ここでは W/C が増加するに従い各物性値は指数関数的に低下する。特に A E 非弾性ひずみが W/C が増加するにつれて著しく減少していくことを示している。

4. 結 論

以上、本研究において水セメント比の異なる3種類のコンクリートについて各種の破壊試験を行い、その破壊試験の過程において発生する A E の検討を行い以下の結論を得た。

- (1) 各水セメント比 W/C のモード I および II の破壊靱性値 K_{IC} , K_{IIC} およびその混合モードの破壊靱性の実験を行い、 W/C の影響を明らかにした。これらの実験結果のうち K_{IIC}/K_{IC} は従来の他の脆性材料の実験結果の 1.1~1.3 よりも大きい約 1.5 であった。これは本研究における円板試験片の中心スリットの作製がステンレス鋼板によっているため粗骨材の分布にある制限を生ずる影響が懸念された。
- (2) コンクリートのモード I, II および混合モード破壊の条件は以下の式によって表せることが明らかとなった。

$$(K_I/K_{IC})^u + (K_{II}/K_{IIC})^v = 1$$

ここで u は 1.33, v は 1.89 である。この実験式によれば K_{IC} と K_{IIC} の値を用い任意の θ 方向のき裂に対する破壊靱性を一般的に評価することができる。

- (3) 圧縮試験における応力-縦ひずみ線図と A E 変化点応力の関係から非弾性縦ひずみ ϵ_{1P} と A E のトータル・イベント数 N_{AE} との間に次式のような関係が認められた。

$$\log N_{AE} = \kappa \cdot \epsilon_{1P} + C$$

ここに κ は単位非弾性縦ひずみあたりのトータル・イベント数の増加量の対数を表す A E 非弾性ひずみ係数であり、 κ は破壊靱性値に指数関数的に対応し、材料の強靱性の一つの指標となるものである。類似する関係式は非破壊的に測定される縦弾性係数についてもみられた。

- (4) 水セメント比のモード I, II の破壊靱性および A E 非弾性ひずみ係数におよぼす影響は次式の形で表せる。

$$S = S_0 \exp \{ -n(W/C) \}$$

ここで S_0 および n は各物性の定数である。上式の S_0 はコンクリートの骨材の粒径にも密接な関連があると考えられ、 n が大きくなるに従い W/C の増加により κ が減少し強度および破壊靱性が低下することが定量的に明らかにされた。

参 考 文 献

- (1) B. Helmut, et al., ASCE, Vol. 99, J. Eng. Mech. Div., (1975) P. 853
- (2) F. H. Wittmann (Edt.) Fracture Mechanics of Concrete, Development in Civil Engineering, Vol. 7 (1983) P. 680
- (3) 児玉武三, セメント技術年報, Vol. 23 (1969)
- (4) 十代田知三, コンクリート・ジャーナル, Vol. 10, No. 10 (1972) P. 1
- (5) 淡路, 佐藤, 材料, Vol. 28 (1978) P. 295, 336, 349
- (6) H. Awaji and S. Sato, J. Eng. Materials and Tech., ASME-H, Vol. 101 (1979) P. 139
- (7) H. Awaji and S. Sato, J. Eng. Materials and Tech., ASME-H, Vol. 100 (1978) P. 175
- (8) S. Sato, H. Awaji and M. Miyauchi, High Temperature-High pressure, Vol. 12 (1980) P. 23

- (9) 日本機械学会, 弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試験方法, (1969)
J S M E S 001 (1981) P. 20
- (10) 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)
- (11) 伊藤茂富, コンクリート工学, 森北出版 (1972)
- (12) 和泉, 三橋, 野村, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol. 360 (1986) P. 1
- (13) S. Sato, et al., J. Nucl. Eng. and Design, Vol. 103 (1978)
- (14) 淡路英夫, 日本機械学会論文集 (A編), Vol. 47, No 421 (1981) P. 880
- (15) 淡路, 川角, 福島工業高等専門学校紀要, Vol. 14-1 (1978) P. 12
- (16) 小坂, 谷川, 日本建築学会東海支部研究部会, (1969)
- (17) B. Paul, Fracture, Vol. II (1968) P. 387
- (18) F. H. Ho, et al., Proc. S M I R T, Vol. 7 L4/6 (1983) P. 127
- (19) 山ノ内正司, 土木学会第 41 回年次学術講演会, Vol. 64 (1986) P. 127
- (20) 後藤幸正, 尾坂芳夫訳, ネビルのコンクリートの特性, 技報堂出版 (1982) P. 277
- (21) E. Ryshewitch, J. Am. Cerm. Soc., Vol. 36 (1953) P. 65
- (22) W. Duckworth, J. Am. Cerm. Soc., Vol. 36 (1953) P. 68
- (23) E. P. Knudsen, J. Am. Cerm. Soc., Vol. 40 (1957) P. 378