

モルタルの多軸応力下における破壊基準

車田 亮*, 今泉水城**, 佐藤千之助*, 福澤公夫***, 沼尾達弥***

(平成2年8月30日受理)

Fracture Criterion of Mortar under Multiaxial Stresses

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

ABSTRACT—Since concrete or mortar is usually used under compressive stress predominant state, we emphasizingly study on the mechanical and fracture mechanics properties, such as uniaxial compressive strength, diametral compressive strength and mode I and mode II fracture toughnesses of three kinds of mortar under compressive stresses. Then a new fracture criterion under multiaxial stresses of tensile and compressive stresses is given from the fracture mechanics approach. During the fracture tests, acoustic emissions (AE) from these specimens are recorded at different stress level up to the final fractures. Initial signals of AE are corresponded to the cracking initiation and are used as a verification to the fracture criterion proposed.

1. 緒 言

近年、構造物の長大化、高層化に伴い、高強度を有するコンクリートやモルタルが要求され、コンクリートの曲げや圧縮による破壊、すなわち、単純な単軸方向破壊についての研究¹⁾が古くから数多くなされてきた。しかし、實際上モルタルやコンクリートなどの構造材は主として圧縮-引張の多軸応力場において実用されており、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。

本研究は、淡路と佐藤が提案した多軸応力化の巨視的破壊基準²⁻⁵⁾をプレーンモルタルおよび高強度モルタルに応用して、多軸応力化の破壊基準を提案したものである。また、これらの破壊試験の過程におけるAcoustic Emission(AE)^{6, 7)}を計測することにより、圧縮応力が支配的な応力場におけるき裂の発生および拘束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 (日立市中成沢町), 現在; 日立製作所銻那珂工場 (勝田市市毛)

Graduate Student, Ibaraki University, Present; Naka Works, Hitachi Ltd., Ichige, Katsuta 312, Japan.

***茨城大学工学部都市システム工学科 (日立市中成沢町)

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

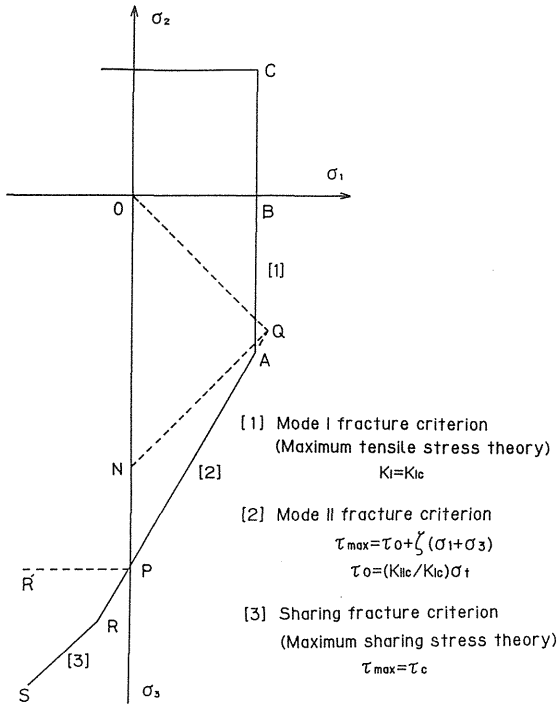


Fig. 1 Macroscopic fracture criteria under multiaxial stress state.

2. 脆性材料の多軸応力化の破壊基準

Fig. 1 に示すようにさきに淡路と佐藤²⁻⁵⁾は、脆性材料の多軸応力化の破壊基準を破壊力学的に検討し、以下の3つの場合に分けて提示した。

直線 [1] は引張応力が支配的な応力場を示し、き裂先端のモード I の応力拡大係数 K_I がモード I の破壊靱性値 K_{Ic} に達すると破壊する。すなわち、

$$K_I = K_{Ic} \quad (1)$$

直線 [2] は圧縮応力が支配的な応力場を示し、その破壊の条件は次式で表される。

$$\tau_{max} = \tau_0 + \zeta(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (2)$$

ここで τ_{max} は最終破断時の最大せん断応力であり、 τ_0 は材料固有の純粋せん断強度であり、 τ_c は一軸引張強度 σ_t と次式の関係がある。

$$\tau_0 = (K_{IIc}/K_{Ic})\sigma_t \quad (3)$$

ここで K_{IIc} はモード II の破壊靱性値である。また、 ζ は圧縮応力 ($\sigma_1 + \sigma_3$) によるき裂の拘束量を表す係数である。図中の点 Q は材料が純せん断応力状態においてモード II 型破壊を起こすと仮想した点 ($\tau_c, -\tau_c$) を表している。点 N は圧縮試験において破壊

に先立つモード II 型き裂伝播の開始点である。式 (2) は破壊力学的根拠が明瞭であり、クーロン・モール(Coulomb-Mohr)基準⁸⁾に形式上類似している。

直線 [3] は圧縮応力が支配的な応力場において、さらにき裂の拘束が大きくなる場合を示し、き裂が最終破壊を起こす前に固有のすべり強度 τ_c に達して、延性的すべり破壊を起こす。すなわち、

$$\tau_{max} = \tau_c \quad (4)$$

ここで点 R は τ_c の大きさによって変わり得る点である。Fig. 1 中の σ_1 , σ_2 および σ_3 はそれぞれ最大、中間および最少主応力である。

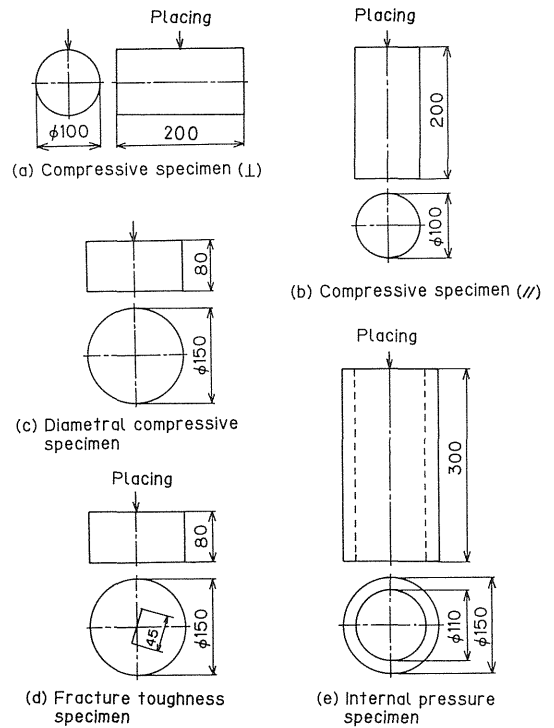


Fig. 2 Shapes, dimensions and placing directions of specimens.

Table I Proportions of specimens of mortar.

| Mortar | Water cement ratio W/C | Maximum size of aggregate G _{max} mm | Percentage of air content % | Quantity of material per unit volume | | | |
|---------------|------------------------|---|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | | Water W kgf/m ³ | Cement C kgf/m ³ | Aggregate S kgf/m ³ | Admixture Σ kgf/m ³ |
| Plain | 0.60 | 5 | 2±1 | 238 | 397 | 1583 | - |
| Plain | 0.25 | 5 | 2±1 | 210 | 840 | 1278 | - |
| High strength | 0.25 | 5 | 2±1 | 210 | 756 | 1278 | 84.0 |

3. 実験方法

3.1 試料および試験片

Table I は本研究に用いた試料モルタルの配合仕様を示す。プレーンモルタルは普通ポルトランドセメント(日立セメント製), 久慈川産川砂および減水剤(花王製マイティ150)を用いて製作され, 高強度モルタルはそれらに加えて混和材(電機化学工業製デンカΣ5000)を用いて製作した。この混和材を用いた高強度モルタルはエントリガイトを比較的多量に生成し, 圧縮強度が増大する⁹⁾。

試験片は打込み後材令2日で脱型し, 20±3℃で材令28日水中養成した後, 実験に供した。

Fig.2 は本研究に用いた試験片の形状, 寸法および打込み方向を示す。これらの試験片はほぼ同体積である。破壊靱性試験片の中心スリットは矩形に切った厚さ0.3mm, 幅45mmのビニールシートを材令2日で抜いて作成した。引張り圧縮の二軸応力下の破壊試験片は円柱試験片の中央を養生中に注意深くボーリングマシンにより繰り抜き円筒形にした。

3.2 実験方法

3.2.1 圧縮試験

圧縮試験は打込み方向と同方向およびそれと垂直方向について行った。また, 圧縮試験片にひずみゲージ(東京測器製PL-60)を軸方向に2枚接着し, 応力-ひずみ曲線を求めた。

3.2.2 圧裂試験

Fig.3 (a) に示すように円板の直径方向圧縮による圧裂試験は, 圧縮応力が支配的な二軸応力場の破壊試験であり, 円弧型圧子を用いHertzの接触圧を考慮した淡路と佐藤^{2, 10, 11)}の開発した方法で行った。圧裂試験における圧縮方向と垂直方向に発生する円板中心の引張応力σ_{H1}は次式から求められる。

$$\sigma_{H1} = \{1 - 1.15(b/R)^2 + 0.22(b/R)^3\} \sigma_p \quad (5)$$

ここでσ_pは集中荷重Pにより圧縮された円板(直径2R, 圧さh)の圧縮方向と垂直方向に生ずるほぼ一様な引張応力であり, (P/πRh)である。このσ_pはJISではコンクリートの引張強度とされている¹²⁾。また, bは円弧型圧子による接触幅の半長である。

3.2.3 破壊靱性試験

破壊靱性試験はFig.3 (b) に示すような, 淡路と佐藤¹³⁾が開発した中心スリットを有する円板の圧裂法により行った。この方法はスリットの傾き角θを変えることにより, モードI, モードIIおよびこれらの混合モードの破壊靱性を簡単かつ系統的に求めることができる。モードIおよびモードIIの破壊靱性値K_{1c}およびK_{1c}は次式から求められる^{14, 15)}。

$$K_{1c, 1c} = N_{1H, 1H} \sigma_p \sqrt{\pi c} \quad (6)$$

ここで, σ_pは円板の直径軸上に生ずる一様な引張応力であり, cは中心スリットの半長である。また, N_{1H, 1H}は荷重がヘルツの分布圧で与えられるときの

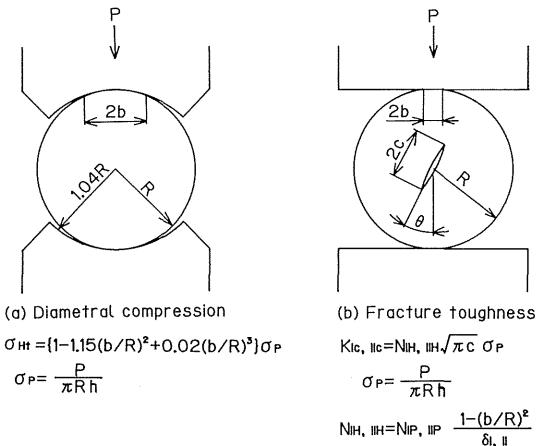


Fig. 3 Testings for disk specimens.

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あり、それぞれ次式で表される。

$$N_{IH}, I_H = N_{IP}, IP \{1 - (b/R)^2\} / \delta_{LI} \quad (7)$$

ここで、 N_{IP}, IP は圧縮荷重を集中力としたときの、モードⅠおよびモードⅡの無次元応力拡大係数であり、本研究のスリット半径比 c/R が0.3の場合、 $N_{IP} = 1.136$ ($\theta = 0$) および $N_{IP} = 1.866$ ($\theta = 27.2^\circ$) である。また、 δ_{LI} は c/R および b/R の関数であり、次式で表される。

$$\delta_{I1} = 1 + \{1.45 - 7.8 (c/R) + 14.7 (c/R)^2\} (b/R)^2 \quad (8)$$

$$\delta_{II1} = 1 + \{-0.08 - 0.9 (c/R) + 2.2 (c/R)^2\} (b/R)^2 \quad (9)$$

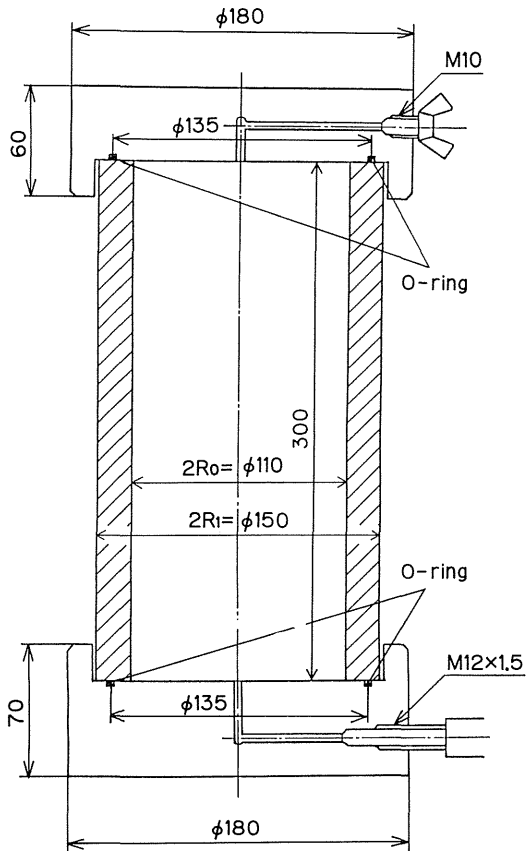


Fig. 4 Assembly of internal pressure testings.

3・2・4 内圧試験

Fig.4 は内圧-圧縮の試験片に軸方向に圧縮を負荷した状態で内圧をかける引張り-圧縮の2軸応力試験装置を示す。試験片の上下端面でOリングによって水

の漏れを防止し、AE計測も併せて行った。

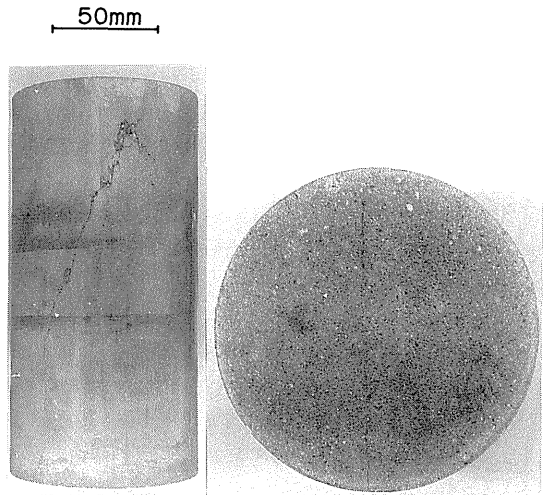
内圧試験片の純内圧 p による円筒の内周における最大円周応力 σ_x は次式から求められる。

$$\sigma_x = (R_o^2 + R_i^2) / (R_o^2 - R_i^2) p = (\kappa^2 + 1) / (\kappa^2 - 1) p \quad (10)$$

ここで R_o および R_i は試験片の外および内半径で、 κ_o は 外内径比 R_o/R_i である。 σ_x は常に引張応力となる。また、軸応力 σ_y は力の釣合いにより、次式から求められる。

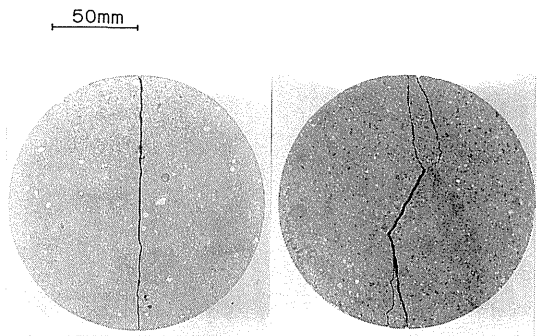
$$\sigma_y = (P - \pi p R_i^2) / \pi (R_o^2 - R_i^2) \quad (11)$$

ここで、 P は圧縮荷重である。



(a) Compression (b) Diametral compression

Photo. 1 Typical fractures of mortar in strength testings.



(a) Mode I (b) Mode II

Photo. 2 Typical fractures of mortar in fracture toughness testings.

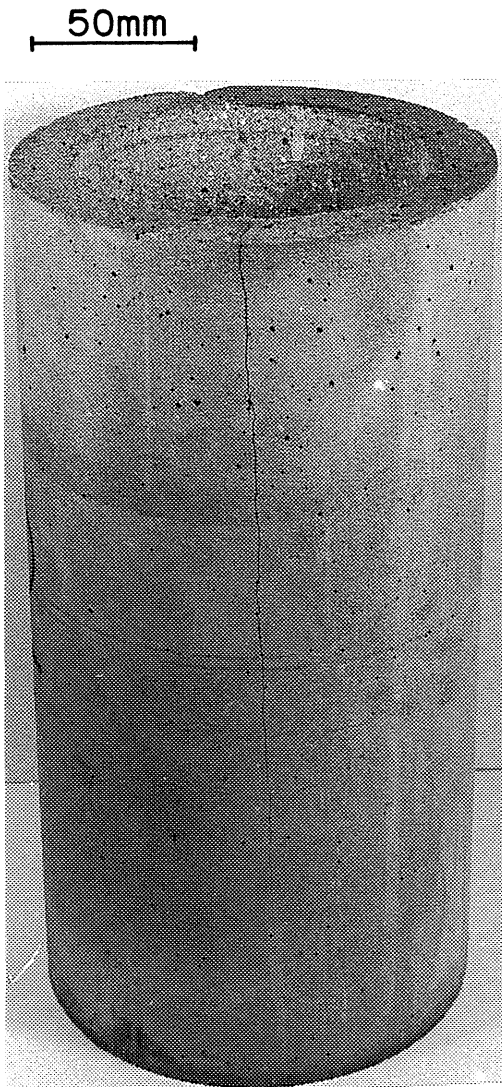


Photo. 3 Typical fracture of mortar in internal pressure testing.

4. 実験結果

4・1 機械的および破壊力学的性質

Table II は本研究で得られた機械的および破壊力学的性質を示す。ここで縦弾性係数 E は圧縮試験における応力-ひずみ曲線の1/3割線弾性係数である。プレーンモルタルは水セメント比が大きくなると、縦弾性係数、圧縮および圧裂強度、モード I および II の破壊靱性値はともに小さくなる。また、高強度モルタルは同じ水セメント比のプレーンモルタルに比べて強度および破壊靱性ともに約10~20%増大するが、縦弾性係数はほぼ一定である。

Photo. 1, 2 および 3 は各試験における破壊状況を示す。圧縮試験片は典型的なモード II 形のせん断破壊の状況を示し、圧裂試験片は円板中央の軸上にき裂が発生している。モード I および II の破壊靱性試験片はスリット先端からモード I および II 形のき裂が発生する。ただし、モード II の破壊靱性試験片は半円板の圧縮による二次的き裂も存在している。内圧試験片は円周方向の引張によるモード I 形の破壊の状況を示している。

Table II Experimental results of mechanical and fracture properties of mortar.

| Mortar | Water cement ratio W/C | Young's modulus E GPa | Compressive strength σ_c MPa | | | Diametral compressive strength σ_{Ht} MPa | Mode I fracture toughness K_{Ic} MPa \cdot m $^{1/2}$ | Mode II fracture toughness K_{IIc} MPa \cdot m $^{1/2}$ |
|---------------|---------------------------|--------------------------|--|---------|------|---|--|--|
| | | | // | \perp | av. | | | |
| Plain | 0.60 | 21.6 | 31.0 | 30.3 | 30.7 | 2.89 | 0.455 | 0.712 |
| Plain | 0.25 | 34.0 | 77.3 | 74.2 | 75.8 | 5.96 | 0.746 | 1.08 |
| High strength | 0.25 | 34.8 | 84.4 | 81.1 | 82.8 | 7.67 | 0.906 | 1.21 |

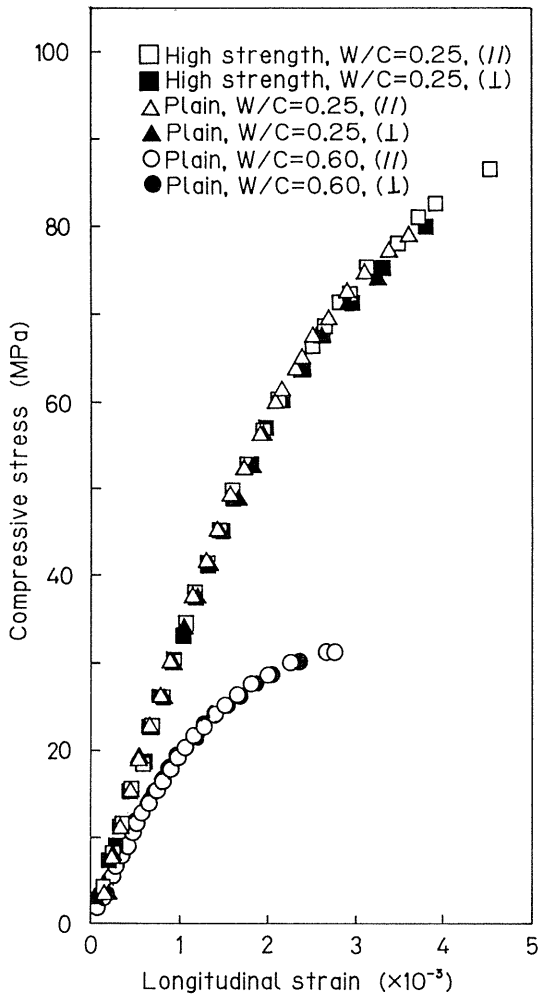


Fig. 5 Comparison of stress-strain plots of mortar in compressive testing.

Fig.5 は圧縮試験における応力-ひずみ線図を示す。試料の打込み方向と平行 (//) および垂直 (⊥) 方向の圧縮強度の比 $\sigma_{(//)} / \sigma_{(\perp)}$ はプレーンおよび高強度モルタルで1.02~1.04となり、本研究のモルタルはその打込み方向に対する異方性を考慮¹⁶⁾ する必要がほとんどない。これは、本研究と同様の円柱形試料についてなされた松井ら¹⁷⁾ の結果とよく一致する。以下、圧縮強度 σ_c は $\sigma_{(//)}$ および $\sigma_{(\perp)}$ の平均値を用いることにする。また、 $W/C=0.25$ の高強度モルタルは同じ水セメントの比のプレーンモルタルと比較して縦弾性係数はほとんど変わらないが、破断ひずみが大きくなる。

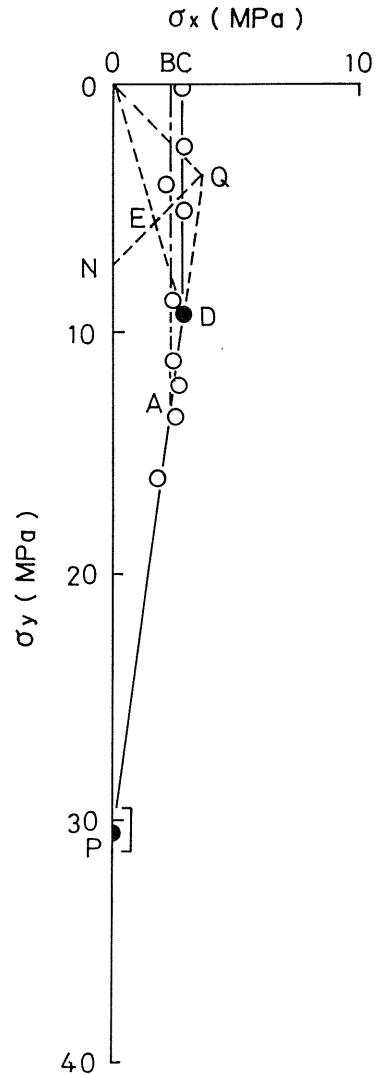


Fig. 6 Experimental results of fracture strengths and fracture criteria of plain mortar ($W/C=0.60$) under multiaxial stresses.

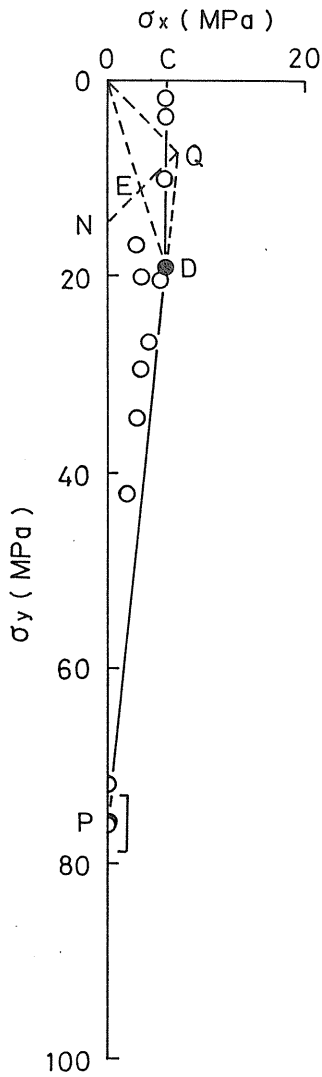


Fig. 7 Experimental results of fracture strengths and fracture criteria of plain mortar (W/C=0.25) under multiaxial stresses.

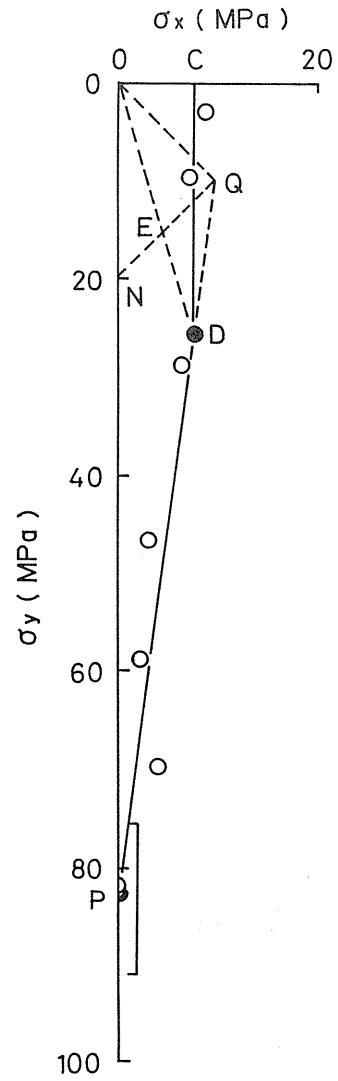


Fig. 8 Experimental results of fracture strengths and fracture criteria of high strength mortar (W/C=0.25) under multiaxial stresses.

4・2 破壊基準線図

Fig.6 はW/C=0.60のプレーンモルタルの引張り一圧縮応力下における破壊基準線図を示す。図中の白丸は、内圧試験によって得られた二軸応力下の破壊データである。ここで、一軸圧縮強度を表す点Pと圧裂試験によって得られた点Dを結んだ線をモードⅡ型破壊の条件と考え、点P、点D、モードⅠおよびⅡの破壊靱性値から、一軸引張強度の点Bを推定して²⁻⁵⁾ 図示すると、一点鎖線BAはモードⅠ型破壊の条件、実線PAはモードⅡ型破壊の条件を示す。この線図では圧裂引張強度は推定一軸引張強度より若干大きくなり、岩石¹⁸⁾ に関してもみられたが、原理的にはあり得ない。これは、モードⅡとモードⅠの破壊靱性値の比 K_{Ic}/K_{IIc} が黒鉛や大理石の値1.1~1.3¹⁴⁾ よりも大きいためであり、スリット加工の困難さに起因するものと考えられる。

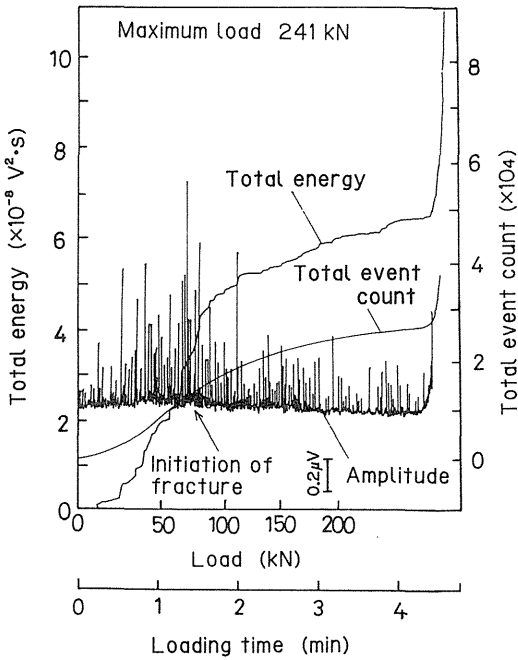


Fig. 9 AE signals of plain mortar (W/C=0.60) in compressive testing.

さて、モルタルや大理石のように引張強度に対して圧縮強度が著しく大きい脆性材料では、圧裂引張強度と一軸引張強度が等しくなる傾向にある¹³⁾。したがって、本研究においても一軸引張強度として圧裂引張強度の値を用いると、実線CDをモードⅠ型破壊の条件、実線PDをモードⅡ型破壊の条件となる。このよ

うにして求めた破壊基準は、白丸で示した内圧試験による破壊のデータをよく満足している。Fig.7 および8 は同様にして描いたW/C=0.25のプレーンおよび高強度モルタルの破壊基準を示す。これらの図においても、破壊基準は内圧試験による破壊のデータをよく満足している。破壊基準線図において直線PD式は次式で表される。

$$\sigma_y = \{ (\sigma_c / \sigma_t) (K_{Ic} / K_{IIc}) - 1 \} \sigma_x - \sigma_c \quad (12)$$

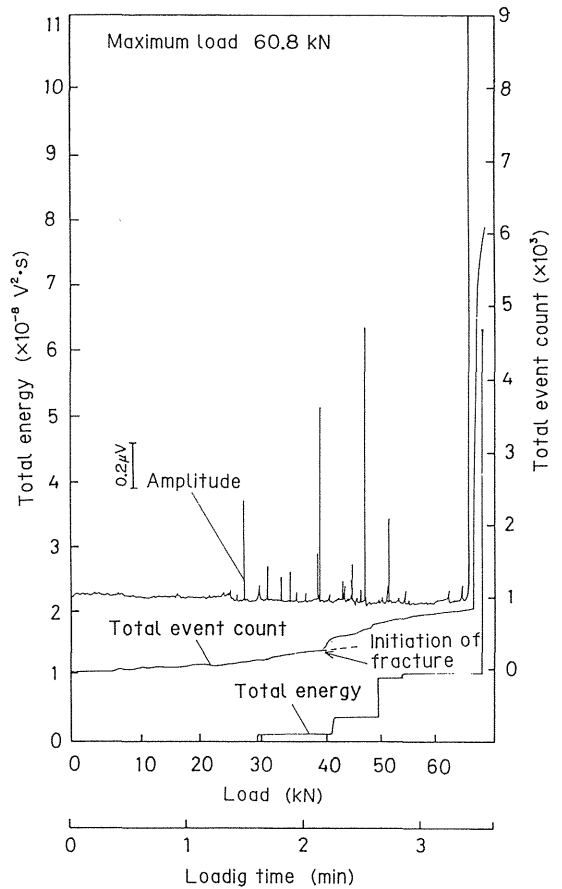


Fig. 10 AE signals of plain mortar (W/C=0.60) in diametral compressive testing.

4・3 破壊基準のAEによる検証

破壊基準線図の破線NQは潜在的せん断破壊の限界線であり外見的な観察は困難であるが、AE計測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でき、本研究で提案する破壊基準の検証を与える。本研究に用いたAE装置は日立エンジニアリング製のAE200システムであり、その増幅度は89.5dBで、周波数帯域は10k~2MHzで、しきい値は5μVである。AE変換子は試験片にグリスをつけて密着させた。

Fig.9はW/C=0.60のプレーンモルタルの圧縮試験におけるAE計測の結果を示す。圧縮試験の初期において平面圧子と試験片との接触によるAEの出力、トータルイベントおよびトータルエネルギーの増大があり、その後AE信号はほぼ安定な出力を示し、最終破断に近づくときAEが急激に発生しAE信号がともに急増する。図において初期のAE信号の急増点を初期破壊点とし、その初期破壊応力の圧縮強度 σ_c に対する比を計算すると、W/C=0.60プレーンモルタル、W/C=0.25のプレーンおよび高強度モルタルについてそれぞれ0.25、0.21および0.22となる。これらの値はFig.5に示した応力-ひずみ線図における弾性的な線形の段階から離脱する点の応力の比率とほぼ一致し、Fig.6, 7 および 8 に示した点Nの応力の圧縮強度に対する比率0.24、0.19および0.24ともほぼ一致する。このことは本研究で提案した破壊基準および微視的破壊について一つの検証を与えるものと考えられる。

Fig.10はW/C=0.60のプレーンモルタルの圧裂試験におけるAE計測の結果を示す。圧裂試験におけるAE信号は円弧型圧子により初期のAE信号の急増が見られず、その後モードII型の微視的破壊が起こり、最終破断に近づくとき微小き裂が連結され、加速的にき裂が伝播して、AE信号が急激に発生する。図においてトータルイベントの初期変化点応力を初期破壊点とし、その応力の圧裂引張強度 σ_{H1} に対する比率を計算すると、W/C=0.60のプレーンモルタル、W/C=0.25のプレーンおよび高強度モルタルについてそれぞれ0.65、0.58および0.52となり、Fig.6, 7 および 8 に示した点Eの応力の圧裂引張強度に対する比率0.61、0.58および0.59とほぼ一致し、提案した破壊基準について一つの検証を与える。

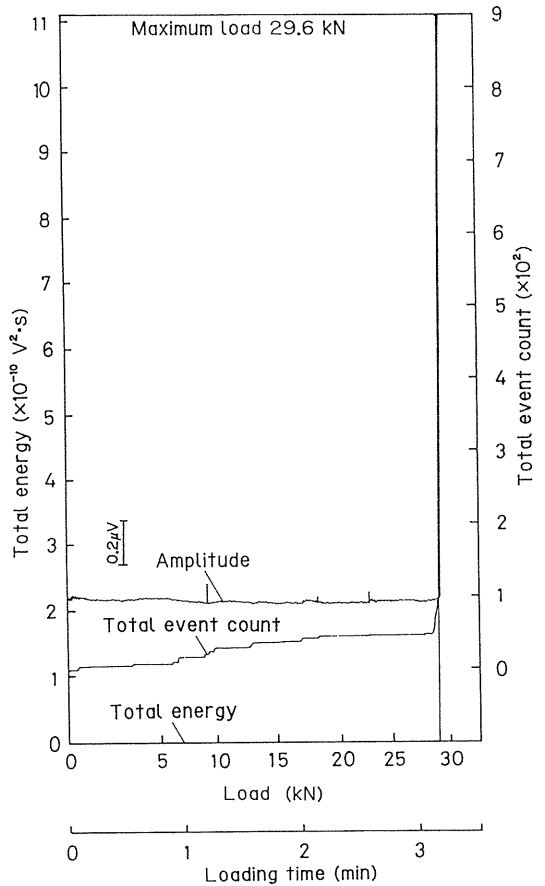


Fig. 11 AE signals of plain mortar (W/C=0.60) in mode I fracture toughness testing.

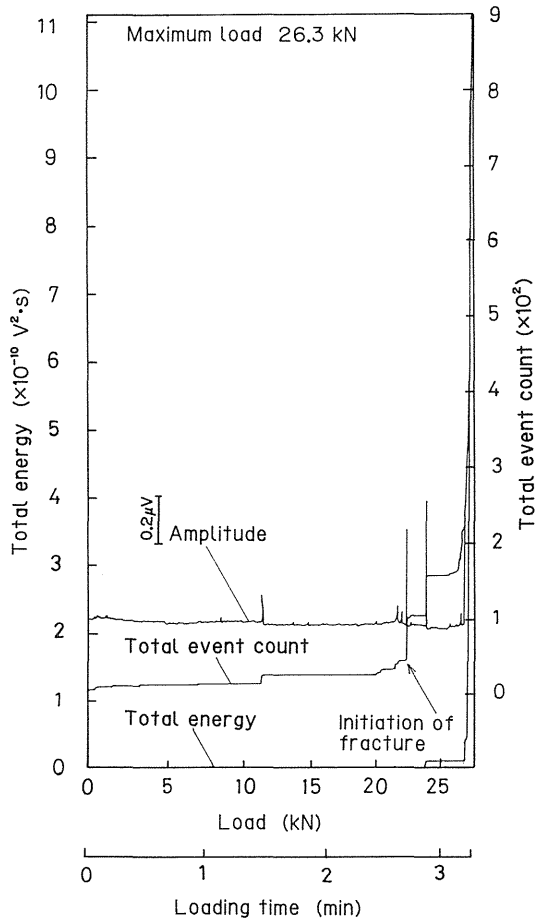


Fig. 12 AE signals of plain mortar ($W/C=0.60$) in mode II fracture toughness testing.

Fig.11 および 12 はそれぞれ一例として $W/C = 0.60$ のプレーンモルタルのモード I および II の破壊靱性試験における AE 計測の結果を示す。モード I の破壊靱性試験における AE 信号は定常的に低い割合で発生し続けるものの、最終破断に至るまで AE の急増はみられない。一方、モード II の破壊靱性試験においては、22 kN で AE 信号の急増点が見られ、この点で $K_I = K_{Ic}$ となり、スリットから分岐き裂の伝播が開始されたものと考えられる。その後、圧縮応力によるき裂の拘束があり、最終破断に至る。この初期破断点における応力拡大係数 K_{I*} を求め、モード I の破壊靱性値との比率を計算すると、どの試料についても $K_{I*} / K_{Ic} \approx 1.3$ となる。この値を用いて破壊基準線図を書くと Fig. 6, 7 および 8 においてモード I 型の破壊基準は実線 CD とほぼ一致し、本研究で提案する破壊基

準に対して潜在的な検証を与えている。

5. 結 論

プレーンモルタルおよび高強度モルタルについて各種の破壊試験を行い、それぞれの試料の破壊基準を提案するとともに、その破壊試験過程において発生する AE を計測することにより、次のような結論を得た。

(1) モルタルは水セメント比が増大すると、強度および破壊靱性ともに減少する。高強度モルタルは同じ水セメント比のプレーンモルタルに比べて、強度および破壊靱性ともに約 10~20% 増大するが、縦弾性係数はほぼ等しい。また、本研究のモルタルの異方性の比率は圧縮強度において 1.02~1.04 となり、その異方性は無視し得る程度であった。

(2) モルタルの多軸応力場における破壊基準線図は一軸引張強度を圧裂引張強度と等しいとおくことにより与えられる。この破壊基準線図は引張-圧縮応力場における内圧試験の破壊データをよく満足する。また、この破壊基準線図は一軸圧縮強度、圧裂引張強度およびモード I および II の破壊靱性値の比のみで設定することができ、実用設計上有用なものである。

(3) 破壊試験中に計測した AE 信号の初期急増点はき裂の伝播開始に対応した。これは圧縮応力が支配的な応力場におけるき裂の拘束過程を経て最終破断に至るとする本研究で提案した破壊基準に一つの検証を与えるものであることを示した。

参 考 文 献

- (1) F.H.Wittmann ed., "Fracture Mechanics of Concrete", Developments in Civil Engineering, Vol.7 (1983), Elsevier, New York.
- (2) 淡路英夫, 佐藤千之助, 材料, 28, 336, 342, 349 (1978).
- (3) H.Awaji, J. Eng. Mater. and Tech., 102, 257 (1980).
- (4) S.Sato, H.Awaji, K.Kawamata, A.Kurumada and T.Oku, J.Nuclear Eng. and Design, 103, 291 (1987).
- (5) 佐藤千之助, 淡路英夫, 川又清弘, 車田 亮, 奥 達雄, 日本原子力学会誌, 28, 1172 (1986).
- (6) 尾上守夫, 山口楠雄, 仲佐博裕, 佐野謙一, 磯野英二, 渡辺哲夫, "アコースティック・エミッ

- ションの基礎と応用”，(1976)，コロナ社。
- (7) 丹羽義次，大津政康，“アコースティック・エミッションの特性と理論”，(1988)，森北出版。
- (8) B.Paul, “Fracture”(H.Liebowitz ed.), Vol. II, 393 (1968), Academic Press, New York and London.
- (9) 影山 博，中川晃次，長瀬 強，材料，29, 222 (1980).
- (10) H.Awaji and S.Sato, J.Eng. Mater. and Tech., 101, 139 (1979).
- (11) 淡路英夫，佐藤千之助，機械の研究，34, 699 (1982).
- (12) J I S A 1113-1976 .
- (13) H.Awaji and S.Sato, J.Eng. Mater. and Tech., 100, 175 (1978).
- (14) 淡路英夫，佐藤千之助，材料，28, 244 (1979).
- (15) S.Sato, H.Awaji and M.Miyauchi, High Temp.-High Press., 12, 23 (1980).
- (16) 佐藤千之助，車田 亮，小野瀬健太郎，今泉水城，井上義夫，植村武夫，茨城大学工学部研究集報，36, 25 (1988).
- (17) 松井嘉孝，笠井芳夫，横山 清，日本建築学会論文報告集，103, 16 (1964).
- (18) 淡路英夫，日本機械学会論文集，A-47, 880 (1981).