

東京大学生産技術研究所

北川 英夫

農林省林業試験場防災部 正会員 ○陶山 正範

1. 破壊力学 (Fracture Mechanics) (F.M.) について

破壊力学は欠陥の存在またはその発生が期待される材料、構造物を強度上安全に使用するための一つの工学的な方法論である。これは米国で創始され、最近では日本や欧州各国でも急速に普及しつつある新しい研究方法であり、特にぜい性材料の破壊強度の解析には線形破壊力学が極めて有効なアプローチである。

Irwin の提案した破壊力学は、き裂進展に伴う弾性エネルギーの解放率を考えると、き裂先端近傍の応力場の強さの限界値をとることとは等価であることを示し、この両条件を支配する単一のパラメータとして応力拡大係数 (Stress Intensity Factor, K [単位 $FL^{-3/2}$]) を導入した。き裂または近似的にき裂とみなされるような欠陥が存在する場合、その先端周辺の応力分布はき裂の形状、寸法や物体全体の形状、寸法には無関係に相似になり、この相似の比率を K が決定する。この K には、き裂および対象物体の形状、寸法、位置、方向、分布などの全ての力学的境界条件を含ませられるので、この K 一つを決めれば、任意物体中の任意のき裂の力学的条件を一義的に決定することができる。き裂の先端から発生する破壊はき裂のごく周辺の応力だけに支配され、従ってその破壊の発生、進行は K の関数になると考えるのである。つまり外力は K という形を通して破壊に寄与する。従って、連続体と見なされる物体であれば、いかなる材料にも適用が可能であるが、計算された K のいかなる関数で破壊が支配されるかは、実験によって確かめなければならない。

ここで K_I はき裂平面に垂直方向に互に分離するように変形 (Opening mode あるいは mode I の変形) したときの K で、理想き裂先端近傍の弾性域応力場の強さを表す尺度であり、負荷荷重に正比例し、試験片の幾何学的形状の関数である。一方、金属における平面ひずみ破壊靱性 (Plane-Strain Fracture Toughness, K_{IC} [$FL^{-3/2}$]) は ASTM Standard, E 399-70 E で指定した試験法¹⁾によって、 K_I をパラメータとして測定した材料特性値である。[1] ASTM Standard, Part 31, E 399-70 E, 1970]

2 セメント硬化材への破壊力学の適用と問題点

コンクリートやモルタルのようなセメント硬化材は、巨視的にみれば連続体と考えられる。ヤング率がほとんど同じであれば、弾性学的には連続体として扱えるので、き裂端の応力分布およびそれと K との関係が求められる。

セメント硬化材の破壊はき裂またはき裂状欠陥の先端から始まる場合には、 K 基準による応力条件はコンクリートにも成り立ち、き裂のごく近傍の材料の強度で破壊が決まる場合には、コンクリートでも F.M. が成り立つと考えても不自然ではない。その成立の有無・程度 限界が主要研究対象となる。

セメント硬化材にも基本的に破壊力学が適用できると確認できれば、次の段階では F.M. を使ってコンクリート構造物の破壊に関する一般的な検討ができる。例えば、セメント硬化材や岩盤に線状または面状の欠陥が想定できるとき、それに対する強度を公称応力で整理すれば、同じ条件の欠陥では強度は同一になるが、一般に強度はき裂の大きさ、形、方向、位置で変化あるものと考えられ、公称応力ではそれを評価できない。F.M. は現在それを解決できる唯一の方法論であると思われる。

F.M. では一般に、き裂をモデル化して、それについての K の値を適用している。従ってそのモデルで実際のき裂入り材料や構造物を説明できるかどうか、また K のどのような関数になるかということは実験で決める必要がある。これが今回の研究の目標である。

さて、金属では平面ひずみ破壊靱性試験法¹⁾が確立しているので、それに従って実験を試みる。その結果によって、修正すべきところは修正して、コンクリート類の破壊靱性試験法の在り方を求めようとするものである。

まき材料足数としての K_{IC} を求める。もし試験片中のき裂長によって K_{IC} が変われば材料足数にはなりえない。このような基礎的な実験に関するデータはわが国ではその例が見当らず、米国でも若干のデータが報告²⁾されているにすぎない。〔2〕Dan Naus, et al.: T. & A.M. Report No 314, 1968, Univ. Illinois

著者らの研究は二つの系列からなる。第1は標準試験片で欠陥の大きさか材料の強度におよぼす影響、第2はコンクリート強度におよぼす試験体の寸法効果をみるの K 基準強度が有効であるかどうかの検討である。

3 今回の破壊靱性試験に採用した方法

セメント硬化体に対する破壊靱性試験法はまだ確立されていないので、まず初めに金属材料の平面ひきみ破壊靱性試験法³⁾をモルタルに準用して、その適用の可否、修正点について検討した。これは切欠きと疲労き裂をつけた試験片の曲げ試験あるいはコンパクト引張試験から成る。今回は3点曲げ片側切欠き梁 (Single-edge notched beam) の曲げ試験を行なったが、“切欠き+疲労き裂”の代わりに“人工き裂”をつけた。

3-1 試験片の形状・寸法

試験片の寸法は、材料の降伏強度 (σ_{YS}) と靱性値 (K_{IC}) に対して、

$$a, B \geq 25 (K_{IC} / \sigma_{YS})^2 \quad (1)$$

の範囲が規定されている。また切欠き長 (a) は、原則的には板厚 (B) に等しく、さらに試験片高さ (W) との間に

$$a = B = 0.45 \sim 0.55 W \quad (2)$$

が成り立つ場合は、これを標準試験片と呼ぶ。ここでは式 (1)、

式 (2) を考慮して $W = 8.0 \text{ cm}$, $B = a = W/2$, $S = 4W$ を採

用し、これをモルタル標準曲げ試験片とした。それとは別に標準外試験片として表1の試験片を作製した。

3-2 試験片の作製

試験片の材料には、材質の均一化、養生期間の短縮化、試験片成形の容易さなどを考慮して、早強ポルトランドセメント、豊浦標準砂、水を重量配合比で1:2:0.6に混合したセメントモルタルを採用した。モルタルの打ち込みにはまず、所定の配合比に秤量した試料を小型コンクリートミキサー (アイリット型、容量30ℓ) で2分間練り、これを以下に示す各種型枠に突き棒を用いて打ち込んだ。

ここで用いた試験片成形用型枠は、曲げ強度試験用の標準型枠 (内面寸法 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$) 中に図1のセーパは上げの鋼板 (②, ③) と溝形鋼 (④) を組立てたもので、き裂試験片では、これに板厚 1.0 mm の磨き鋼板 (S41C) ①をき裂予定位置に挿入固定した。また圧縮強度および弾性係数試験用には、モルタル供試体用円柱型枠 ($5 \text{ cm} \phi \times 10 \text{ cm}$) を用いた。

打ち込み終了後24時間型枠のまま湿空中 (20°C) で養生したのち、曲げ試験片は脱型し、圧縮試験用供試体はギャッピング後更に24時間湿空中で養生したのち脱型し、ともに14日間、水温 20°C で水中養生した。養生後は両者共4日間、室温にて乾燥した。

3-3 試験装置

曲げ試験は図2のような3点曲げ方式である。両支点および中央載荷端のころの半径は、スパン長 $S = 16 \text{ cm}$ に対しては 10 mm 、それ以外のスパン長に対しては 20 mm である。

表-1. 試験片種別と型枠内面寸法

試験片種別	高さ W (mm)	板厚 B (mm)	き裂長 a (mm)	試験片長 (mm)
840	80	40	0	400
841			8	
843			24	
845			40	
643	60	30	20	
630			0	
635			30	
440	40	40	0	
425		20	20	

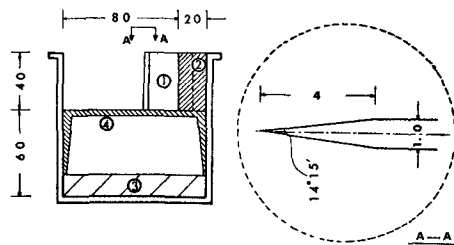


図-1 試験片成型用型枠とき裂成形板尖端の詳細 (mm)

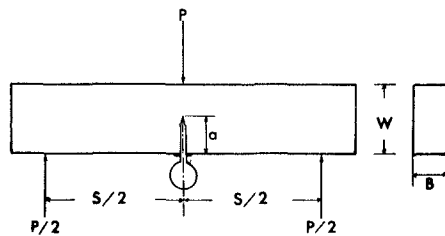


図-2 曲げ試験片形状と載荷法

き裂端の開口変位量の測定には図3のようなき裂開口変位計 (Displacement Gage)と動ひずみ測定器 (DPM-6E型), 電磁オシログラフ (RMV-300型)を用いた。試験機はアムスラー式型引張試験機 (試験容量 500 kg および 300 kg) である。

3-4 実験方法

試験片の寸法測定は, ASTM に規定された許容公差の範囲内におさめなければならないので, 試験片の板厚 B , 高さ W は試験前後に1ギス (最小目盛 $1/20$ mm) で測定した。き裂長さ a の測定は, 試験片成形時にき裂成形板の取付け寸法を1ギスで計測して調整し, さらに破壊後のき裂長さを両破断面からそれぞれ箇所以上計6箇所以上, 読み取り顕微鏡 (最小目盛 $1/100$ mm) で測定した。

開口変位量の測定には, 試験片の開口部に脱着可能なゲージ支持具を接着剤で固定し, これにき裂開口変位計を装着した。変位計の出力は動ひずみ測定器で増幅して電磁オシログラフに自記させたが, 荷重は試験機の日盛盤から直接読み取った。従って荷重—き裂開口変位 ($P-\delta$) 曲線は, 時間—荷重記録と時間—変位量曲線とを調整して求めた。その結果は図4に示す。なお, ここで用いる試験片の材料に関する力学的性質をみるため, 圧縮破壊試験を行ったので, その結果を表2に示した。

3-5 試験結果と K_{IC} の計算

3点曲げによる破壊試験の結果をまとめたのが表3である。表中の破壊荷重とは試験片が破断した時の荷重で, 今回の実験では最大荷重と一致した。

K_I の値は次式で計算した。

$$K_I = Y \cdot \frac{6M\sqrt{a}}{BW^2} \quad (3)$$

$$Y = 1.93 - 3.07\left(\frac{a}{W}\right) + 14.53\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25.11\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25.80\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (4)$$

ここで M はき裂部における曲げモーメント, Y は a/W 比のみで表まる無次元補正項である。なお, 式 (4) は図5の曲線³⁾で表わされるが, これによって式 (3) の計算が容易になる。[3] ASTM STP 410, 1966]

また, $Y = \sqrt{\frac{a}{W}} \cdot Y$ とおけば, 式 (3) は次式となる。

$$K_I = Y \cdot \frac{PS}{BW^{3/2}} \quad (5)$$

ここで $B = W/2$, $S = 4W$ の場合には, 式 (3) は式 (6) に, 式 (5) は式 (7) のように単純化される。

$$K_I = 12Y \cdot \frac{P\sqrt{a}}{W^2} \quad (6)$$

$$K_I = Y \cdot \frac{P}{W^{3/2}} \quad (7)$$

式 (7) では, き裂長さ a が全て a/W の比として Y に含まれるので, K_I におよぼす a の影響をみるのに便利である。

さて, K_I の式で荷重 P に破壊荷重 P_f を用いれば, K_I 値として最大

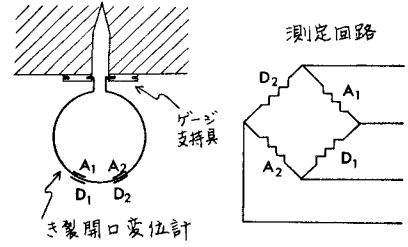


図-3 き裂開口変位計

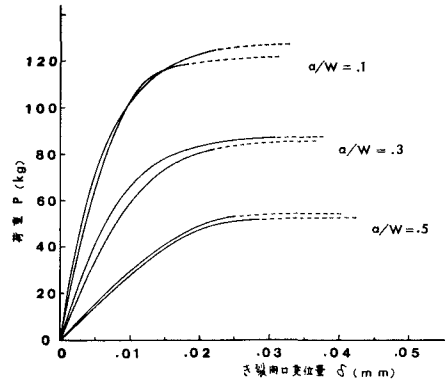


図-4. 荷重—き裂開口変位量曲線

表-2. 試験片材料の力学的性質 (供試体8個の平均値)

供試体寸法 (cm)	W/C	S/C	フロー値 (g/cm ³)	単位容積質量 (g/cm ³)	最大荷重 (kg)	圧縮強度 (kg/cm ²)	ヤング率 E × 10 ⁶ (kg/cm ²)	ポアソン比 ν
φ5 × 10	0.6	2.0	206~204	2.14	8,930	455	0.218	0.198

(注) 8個の供試体は引張試験後下部が円錐状に残って破壊した。

表-3. 試験片形状寸法と破壊試験の結果

試験片 名称	W (cm)	B (cm)	a (cm)	a/W	B/W	S/W	単位容積質量 (g/cm ³)	平均荷重 (kg)	破壊荷重 (kg)	破壊強度 (kg/cm ²)	ヤング率 (kg/cm ²)	ポアソン比
840-1	8.03	4.07	0	0	0.51	4.0	2.16	19.8	156.0	285	—	—
840-2	8.07	4.02	0	0	0.50	4.0	2.10	23.7	179.0	328	—	—
841-1	8.00	3.99	0.80	0.10	0.50	4.0	2.12	19.8	122.0	22.9	35.8	—
841-2	8.01	4.07	0.82	0.10	0.51	4.0	2.13	19.6	127.5	23.4	37.0	—
841-3	8.00	4.02	0.80	0.10	0.50	4.0	2.13	19.0	135.0	25.2	39.3	—
841-4	8.00	4.01	0.80	0.10	0.50	4.0	2.14	18.2	127.5	23.8	37.2	—
843-1	8.01	4.01	2.46	0.31	0.50	4.0	2.14	20.3	87.0	16.2	47.3	—
843-2	8.00	4.06	2.47	0.31	0.51	4.0	2.14	16.9	87.5	16.2	47.3	—
843-3	8.00	4.03	2.45	0.31	0.50	4.0	2.13	15.9	85.5	15.9	46.3	—
843-4	8.03	4.00	2.40	0.30	0.50	4.0	2.13	16.0	88.5	16.5	47.1	—
845-1	8.03	3.99	4.00	0.50	0.50	4.0	2.12	12.6	52.0	9.7	48.3	—
845-2	8.02	4.05	3.99	0.50	0.51	4.0	2.14	13.3	53.0	9.8	48.5	—
845-3	8.02	4.09	4.00	0.50	0.51	4.0	2.15	13.7	54.5	9.9	49.6	—
843-1	5.97	4.07	2.03	0.34	0.68	5.4	2.12	11.3	45.0	14.9	40.8	—
843-2	5.94	4.11	2.02	0.34	0.69	5.4	2.15	13.1	52.5	17.4	47.5	—
630-1	5.97	3.05	0	0	0.51	4.0	2.18	23.4	148.0	49.0	—	—
630-2	6.03	3.05	0	0	0.51	4.0	2.15	20.5	133.0	43.2	—	—
635-1	6.02	3.05	2.97	0.50	0.51	4.0	2.20	15.3	37.5	12.2	52.4	—
635-2	5.98	2.99	3.13	0.52	0.50	4.0	2.17	15.5	31.0	10.4	48.7	—
440-1	4.03	4.00	0	0	0.99	7.7	2.11	13.0	49.5	36.6	—	—
440-2	4.12	3.93	0	0	0.95	7.8	2.15	12.0	57.0	44.0	—	—
440-3	4.04	4.01	0	0	0.99	7.7	2.12	14.1	64.0	46.9	—	—
425-1	4.07	2.04	2.02	0.50	0.99	4.0	2.12	3.3	16.3	11.6	40.8	—
425-2	4.03	2.02	2.05	0.51	0.50	4.0	3.10	3.4	13.6	9.9	36.3	—

$$* Y = \frac{12}{\sqrt{a}} - \frac{6M}{BW^2}$$

応力拡大係数 K_f が得られるが、図4の荷重—き裂開口変位曲線から求めた有効な P_a を用いれば、 K 値として“valid な K_{IC} ” が得られる。

4. モルタルの破壊靱性の K 依存性に対する検討

欠陥の寸法を変えると、荷重基準のモルタルの強度は当然変わるが、 K 基準強度ではいかになるかをみるため、き裂長さ a の異なる4種類の標準試験片について、破壊条件を破壊荷重 P と応力拡大係数 K で整理して、これを図6に示した。その結果、荷重 P_f と P_a は a/W に従って著しく変わるが、 K_f と K_{IC} とは a/W にかかわらず大きな変動がみられず、材料強度値としては P_a や P_f より著しく優れている。しかも同一条件で試験して得られた K_f, K_{IC}, P_f, P_a の値にはばらつきが少ない。従って上記の傾向は実験のばらつきによるものではなく、この結果から得られた結論は非常に安定したものであると信じられる。

K_f と K_{IC} との変化はほぼ同一傾向を示しているの、モルタルの強度基準としては両者いづれを採用することもできると考えられる。しかしながら K_{IC} の

決定には P_a の決定作業を伴うので、その点を考慮すれば P_f を用いて計算した K_f の方が有利であると考えられる。いづれにしても K_f や K_{IC} は P_f や P_a に比べて a/W の差の影響を受けることが少なく、ほぼ一定値に近くなる。従って材料定数としての強度値としては P より K の方が格段に優れていることが結論できる。ただし、き裂が特に浅い場合 ($a/W = 0.1$) については更に実験法を再検討し若干の低下傾向の理由を追求する予定である。

5. モルタルの破壊強度における寸法効果

モルタルの強度に与える試験片の寸法効果の影響をみるため、寸法のみ異なる3種類の相似な試験片 ($a/W = 0.5$) について、破壊条件を P と K で整理すれば図7になる。この図から明らかに、 P_f と P_a はともに試験片の寸法によって大きく影響を受けるが、これに比較して K_f と K_{IC} はいずれもあまり大きな影響を受けない。図6 欠陥の寸法とモルタルの強度 ($B = \frac{W}{2}, S = 4W, W = 8\text{cm}$) 従って、少なくとも K 基準強度は寸法効果の影響をほとんど受けないものと推察される。

試みに $K_f = \text{const}$ として、試験片の代表寸法 W に対する破壊荷重 P を計算し、その上に実験値をプロットしてみると、図8のように実用上十分な一致が得られる ($K_f = 48\text{t}$)。従って、寸法効果を考慮した破壊荷重推定ができることがわかる。

本稿を終えるに際し有益な御指導と多大の便宜を与えられた東大生研小林一輔助教と伊藤利治教官に深謝の意を表したい。図7 試験片の寸法とモルタルの強度 ($a/W = 0.5$)

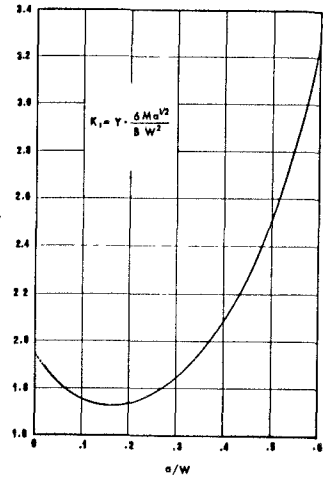
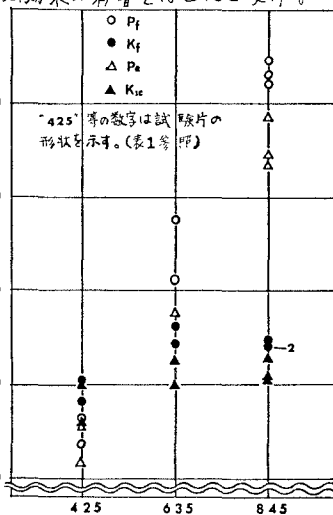


図-5 無次元補正項 Y と a/W の関係³⁾

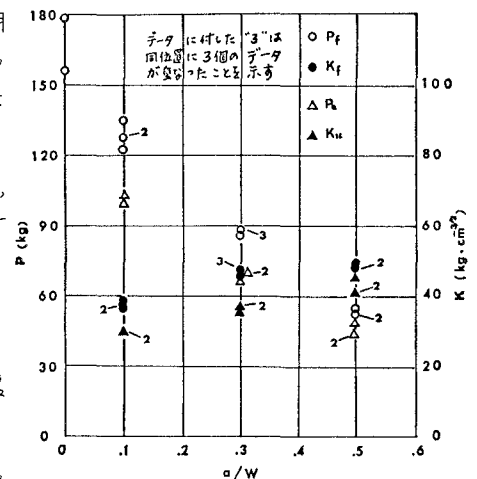


図-6 欠陥の寸法とモルタルの強度 ($B = \frac{W}{2}, S = 4W, W = 8\text{cm}$)

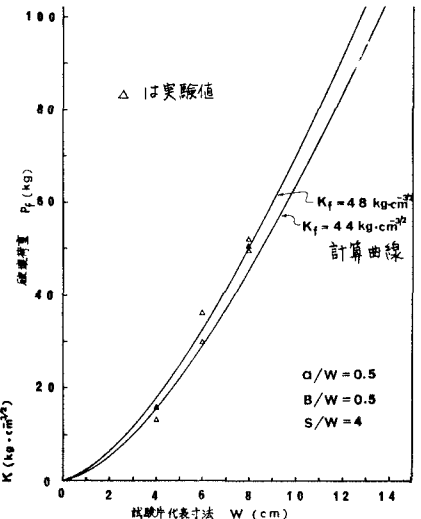


図-8. 相似試験片の寸法が破壊荷重に及ぼす影響の計算値と実験値 (Δ 印) の比較