

コンクリートの強度評価法について

林業試験場九州支場 陶山 正憲

1. 平滑材強度とき裂材強度の非可逆性

コンクリートのようなぜい性材料は、圧縮強度に比して引張強度が著しく低いという特性を示し、その破壊は“割れ”の形態をとることが一般に認められている。これはコンクリートが複雑な複合機構を有するとともに、材質的には空隙や微小き裂のような、き裂または力学的にき裂と等価と見なされる欠陥（不連続部）を含む不均質材料であることが、その主たる原因の一つと考えられる。すなわち、欠陥材の強度は一般に、欠陥の形状、寸法、方向、位置、分布などによって変るものと考えられるが、従来公称応力基準では、これらの材料中の欠陥を正確には評価できない。したがって、コンクリートの強度評価には、“平滑材”としての強度とともに“き裂材”としての強度を合わせ考える必要がある。このようなき裂材強度の評価には、現在、破壊力学的手法を適用するのが有効である。

さて、コンクリートやモルタルのようなセメント硬化体の強度解析に破壊力学を最初に適用したのは Kaplan であり、その後いくつかの適用例があるが、これら一連の研究は破壊力学の初期の成果を適用したものである。しかしながら、破壊力学は1958年に成立して以来急速な進歩をとげ、金属材料などについては、破壊力学の新しい成果の適用による破壊靱性値の決定などに関する研究が、現在広く行われている。

本報では、まず従来材料力学と新しい線形破壊力学における力学的環境のパラメータについて比較検討を行い、次にコンクリートへの破壊力学の適用例として、破壊靱性試験の成果を要約する。

2. 材料強度のパラメータとしての破壊靱性

材料力学と線形破壊力学における力学的環境のパラメータを表-1に併記した。

まず材料力学では、外力によって構造物中に生じる応力 σ やひずみ ϵ を求め、その σ や ϵ のもとで材料が破損または破壊しないかどうか、あるいは逆に材料強度 σ_{ys} が与えられたとき、いかなる外力までは耐えうるかを検討する。そのとき σ や ϵ という力学的環境を表わすパラメータを媒介として、一般的には材料強度と構造物強度とが対応づけられる。

これに対して破壊力学は、欠陥の存在あるいは発生が危惧される材料・構造物を強度上安全に使用するための工学的な方法論であり、その適用範囲は広く、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。破壊力学では、き裂の進展にともなう弾性エネルギーの解放率を考慮することと、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 ）また

表-1. 材料力学と線形破壊力学における力学的環境のパラメータの比較 ($G \equiv K^2/E$, E は縦弾性係数)

	現象例	力学的環境のパラメータ	左の現象の起きる条件式	材料強度のパラメータ
材料力学	降伏	応力 σ またはひずみ ϵ	$\sigma = \sigma_{ys}$	降伏応力 σ_{ys}
線形破壊力学	ぜい性破壊	応力拡大係数 K またはエネルギー解放率 G	$K = K_c$ または $G = G_c$	破壊靱性 K_c または G_c

はエネルギー解放率 $G (= K^2/E)$ を導入している。この K や G は上例の σ や ε に相当し、表-1 のようにいずれも力学的環境を表わすパラメータとなるので、 K や G を媒介として材料強度と構造物強度を対応づけることができる。さて、応力拡大係数にはき裂および対象物体の形状、寸法、位置、方向分布などのすべての力学的境界条件を含ませることができるので、この K ひとつを決めれば、任意物体中の任意き裂の力学的条件を一義的に決定することができる。つまり、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、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。したがって、連続体とみなされる物体であれば、いかなる材料にも破壊力学の適用が基本的には可能となるので、コンクリートのようなセメント硬化体への適用性が十分考えられるわけである。

3. コンクリートの破壊靱性試験と成果の要約

応力拡大係数 K の等しい二つのクラックが、その先端周辺において小規模降伏状態であれば、両者の弾性応力分布は合同になる。したがって、一方である現象が起きれば、他方でも同じ現象が起きるはずである。この考え方に基づいたぜい性破壊発生条件式は、 $K \geq K_c$ である。この式は、考之方は全く異なるが、 G と K が一対一対応をしているので、エネルギー・バランスの条件式、 $G \geq G_c$ と同等である。上記の条件式の K_c および G_c は、ともに破壊靱性 (Fracture Toughness) と呼ばれている。この破壊靱性値は、破壊発生時の荷重とそのときのき裂寸法から算出する。したがって、破壊力学をコンクリートに適用する場合には、まずコンクリートの破壊靱性試験を行う必要がある。

3. 1 曲げによるコンクリートの破壊靱性試験の方法

これは ASTM 規準の“平面ひずみ破壊靱性試験法”に準拠したもので、図-1 に示す3点曲げ片側切欠き梁の曲げ試験である。破壊時の荷重 P_Q は、荷重～き裂開口変位量 ($P \sim \delta$) 曲線から求め、破壊靱性値はこの P_Q を用いて、

$$K_I = 6YM \sqrt{a} / BW^2$$

$$\text{ここで } M = PS / 4$$

で計算する。欠陥の寸法比に対する K 基準強度を図-2 に示す。

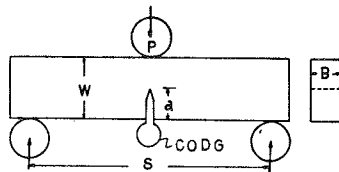


図-1 片側切欠き梁試験片

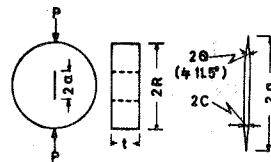


図-3 円板試験片の形状

3. 2 圧縮による破壊靱性試験法

これは図-3 に示す中央スリット入りコンクリート円板の集中圧縮試験で、破壊靱性値は次式で算出する。

$$K_I = FP \sqrt{a/\pi} / Rt$$

$$\text{ここで } F = 1.0 + 1.5(a/R)^2$$

モルタルとコンクリートの P 基準強度と K 基準強度を、円板直径 ($2R$) 別に整理すると図-4 のようになる。結果として、セメント硬化体の材料定数としての K 基準強度の有効性が結論的に推察される。

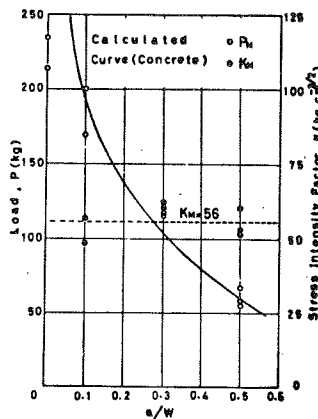


図-2 曲げによる試験結果

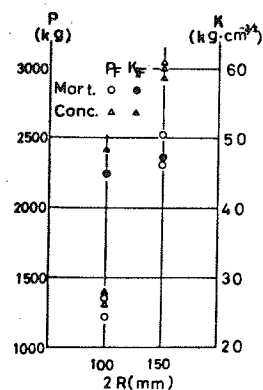


図-4 圧縮による試験結果