

セメント硬化体の応力拡大係数について

林業試験場九州支場 陶山正憲

セメント硬化体の強度解析への破壊力学の適用性

コンクリートのようなセメント硬化体は、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。これはセメント硬化体が複雑な複合機構を示すと共に、材質的に空隙や微小き裂のような、き裂または力学的なき裂と等価と見なされる欠陥(不連続部)を含むぜい性材料であることが、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わるものと考えられるが、従来の公称応力基準では、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、コンクリートのようなセメント硬化体の強度評価には、“平滑材”としての強度と共に“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最も有効であると考えられる。

さて、コンクリート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Kaplan¹⁾であり、その後いくつかの適用例²⁾があるが、これら一連の研究は破壊力学の初期の成果³⁾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⁴⁾されて以来、急速な進歩をとげ、現在までに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広く行われている。

本報では、まず従来の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言及し、次にセメント硬化体への破壊力学の適用性と問題点を検討するため、既往の各種破壊靱性試験の成果を要約する。

応力拡大係数と応力またはひずみとの関係

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を表-1に示す。

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	$\sigma = \sigma_{ys}$	降伏点 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

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新しい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、き裂進展に伴う弾性エネルギーの解放率を考えることと、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: SIF, 記号 K) またはエネルギー解放率 G ($\equiv K^2/E$) を導入している。この K や G は上例の σ や ϵ に相当するもので、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。



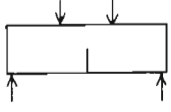
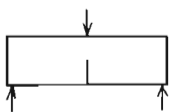
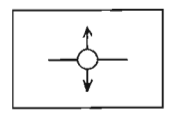
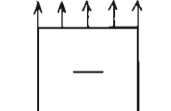
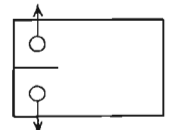

さて、応力拡大係数にはき裂および対象物体の形状、寸法、位置、方向、分布などのすべての力学的境界条件を含ませることができるので、この K 一つを決定すれば、任意物体中の任意き裂の力学的条件を一義的に決定することができる。つまり、き裂の先端から発生する破壊は、き裂のごく周辺の応力だけに支配され、その破壊の発生、進行は K の関数になると考えるのである。したがって、連続体と見なされる物体であれば、いかなる材料にも破壊力学の適用が基本的には可能となるので、モルタルやコンクリートのようなセメント硬化体への適用性も考えられるわけである。

セメント硬化体の破壊靱性試験と既往の成果の要約

応力拡大係数 K 値が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、両者の弾塑性応力分布は合同になる。したがって、一方である

表-2 セメント硬化体の破壊靱性試験に従来使用された試験片のタイプと破壊靱性値の範囲

Specimen Type	Investigator	K_{Ic} (kg·cm ^{-3/2})	
		Concrete	Mortar
	KAPLAN	56~94	65~80
	LOTT & KESLER	35~42	30~34
	BROWN	47~70	30~50
	KAPLAN	58~118	68~91
	MOAVENZADEH & KUGUEL	24~26	13~16
	NAUS & LOTT	38~78	21~58
	KITAGAWA & SUYAMA	53~62	45~53
	NAUS	35~146	30~129
	ROMUALDI & BATSON	-	35~53
	BROWN	66~82	40~46
	FORZANI & BATSON	-	66~108
	KITAGAWA, KIM, & SUYAMA	48~59	45~47

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、考え方は全く異なるが、

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、応力拡大係数のわかっている試験片を用いて、破壊発生時の荷重とそのときのクラック寸法から算出する。現在、破壊靱性試験に多く用いられている試験片は、ASTMの3点曲げおよびCompact tension試験片で、これは特にぜい性材料の試験片に適している。

さて、セメント硬化体に対する既往の破壊靱性試験の結果を、使用された試験片のタイプ別に要約して、表-2に示す。そのほとんどの成果は、新しい破壊靱性試験法⁵⁾の確立(1970年)以前の試験法によるものであるが、これら一連の試験成績を検討すれば、次のような問題点が指摘される。

(1) コンクリートやモルタルのようなセメント硬化体の破壊は、材質的な不均質性と潜在性欠陥の存在により、複雑な破壊過程をたどる。

(2) セメント硬化体のき裂伝播に対する抵抗性を評価するため、種々の試験片タイプによる試験が実施されてきたが、ほとんどの場合、“valid”な破壊靱性値は示されず、むしろその相対的な傾向のみを示す結果にとどまっている。

(3) すべてのセメント硬化体に共通な単一の破壊靱性値は存在しない。ここで得られた破壊靱性値はいずれも、それぞれの実験に用いたセメント硬化体のシステムにのみ有効である。

(4) 各種セメント硬化体の破壊靱性 K_c を比較すると、セメントペーストよりモルタルの K_c 値の方が大きく、モルタルよりコンクリートの K_c 値の方がさらに大きくなる傾向を示す。すなわち、母材としてのセメントペーストに細・粗骨材各粒子が加わると、破壊エネルギーの増大がもたらされる。

引用文献

- (1) Kaplan M. F. : J. ACI, 58(5), 591~610, 1961
- (2) Naus, D. J. et al : FM of Ceramics 2, 469~482, 1974
- (3) Griffith, A. A. : Phil. Trans. Roy. Soc. London, A-221, 163~198, 1921
- (4) Irwin G. R. : Trans. ASME, J. Appl. Mech., 24, PP. 361, 1957
- (5) ASTM Committee : ASTM Standard, E399-70T, 911~927, 1970
- (6) ——— : ASTM Standard, E399-74, 432~451, 1974