

1 はじめに

公共性の高い砂防事業において、砂防構造物の安全設計と事故診断技術の向上を図ることは緊急かつ重要な問題であるので、砂防構造材料として一般に使用される各種のセメント硬化体について破壊靱性試験を行い、それらの結果について若干の検討を行った。

さて、プレーンコンクリートのようなセメント硬化体は、一般に圧縮強度に比べて引張強度や曲げ強度が低く、その破壊機構も“割れ”の形態をとる脆性材料であり、比較的クラックを生じやすい欠点を有している。このようなプレーンコンクリートの欠点を改善するため、従来から「鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete, SFC)」の開発研究が進められている。これは、コンクリートの中に鋼繊維を分散混入させて、プレーンコンクリートの弱点を補った複合材料であり、引張強度や曲げ強度特性と共に「破壊靱性」が著しく向上される点が特に注目されている。

本報では、プレーンコンクリートや鋼繊維補強コンクリートのようなセメント硬化体の材料定数としての破壊靱性値 (K_I) を求めるため、著者らの開発による破壊靱性試験法をセメント硬化体に適用し、得られた結果について若干の破壊力学的検討を加えた。

2 圧縮破壊靱性試験の方法とセメント硬化体の配合

セメント硬化体試験片の形状は、中央スリット入り円板で、その寸法は直径 $2R = 20$ (cm)、板厚 $t = 2R/3$ 、スリット長 $2a = 4$ (cm)、スリット幅 1 (mm) を目標に成形した。これとは別に、同一直径、同一板厚のスリット無し円板試験片も作製した。

試験の方法は、円板の中心に集中圧縮荷重を負荷する方法であり、その際、荷重線と円板スリットの傾斜角は、 $\beta = 0, 30, 45, 60, 90^\circ$ に変えて試験を行った。なお、荷重の増加に伴って発生する亀裂の位置、伝播方向等も詳細に観測した。使用した試験機は、アムスラ型耐圧試験機 (使用容量 25ton) で、荷重速度はほぼ一定に保った。

供試セメント硬化体の破壊特性は、使用する骨材等の示方配合や鋼繊維の種類等によって異なることも予想されるので、細骨材と共に 2 系列の粗骨材 (A, B) および 2 系列の鋼繊維 (ISF-25, -32) を使用した。これらの骨材と鋼繊維の組み合わせにより、表 1 に示す 2 系列のプレーンコンクリートと、2 系列の鋼繊維補強コンクリートを打設し、前記のような円板試験片を作製した。なお、使用したセメントは普通ポルトランドセメント、骨材は細骨材が川砂、粗骨材が川砂利である。

3 応力拡大係数の近似解と実用性についての検討

中央スリット入り円板が、スリット線に沿って集中圧縮荷重を受ける場合の応力拡大係数 (K_I) は、円板の中心を座標軸の中心とする極座標 (α, ρ) を用いて、

$$K_I = \sigma_a (\alpha = \beta, \rho = a) \cdot \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

で表される。式 (1) の解は $a/R = 0.7$ までは、有効数字 4 桁まで一致するが、無スリット円板が集中圧縮荷重を受ける場合には、荷重線に沿って一様な引張応力 $P/\pi Rt$ を発生するので、 $\beta = 0^\circ$ のすべての a/R に対して式 (1) を無次元化すると、無次元応力拡大係数

$$F = K_I / (P \sqrt{a/\pi} / Rt) \quad (2)$$

は一定 ($F = 1.0$) となる。

しかしながら、この無次元応力拡大係数の式 (2) は、外部の境界条件を無視しているのので、現実に $F = 1.0$ になるかどうかの確認が必要である。これについては、式 (2) の計算値と a/R との関係を示した事例 (1) を引用すれば、この F 値は a/R 比の増加と共に増大するが、 $a/R \leq 0.4$ 程度までは、

$$F = 1.0 + 1.5(a/R)^2 \quad (3)$$

の近似式で実用上十分な精度が得られることがわかった。従って、本実験に使用した試験片の寸法は、 $a/R = 0.2$ であるので、ここでは式 (3) を適用して、最大荷重 (P_M) に対する最大応力拡大係数 (K_{IM}) および破壊時の荷重 (P_I) に対する応力拡大係数 (K_I) を、それぞれ式 (2) で計算した。

4 破壊靱性試験の結果に対する検討

4. 1 スリット傾斜角が破壊荷重に及ぼす影響

スリット傾斜角 β の変化が、最大荷重 P_M 、破壊荷重 P_f に及ぼす影響をみるため、各 β に対する 2 系列のプレーンコンクリートのスリット入り円板試験片と無スリット円板試験片の P_f 値、ならびに各 β に対する 2 系列の鋼繊維補強コンクリートのスリット入り円板試験片と無スリット円板試験片の P_M 値を、それぞれ同一座標系に示して比較検討を行った。

結果として、プレーンコンクリートについては、中央スリット入り円板の P_f 値は、 $\beta = 90^\circ$ を除き顕著な影響は認められないが、いずれにしても無スリット円板の P_f 値に比し、スリット入り円板の P_f 値の方が、バラツキは小さくなることが推論される。

一方、鋼繊維補強コンクリートの場合には、破断時の最大荷重 P_M は、 β の増大につれて若干増大する傾向がうかがわれるが、この傾向はあまり顕著ではない。また、使用した鋼繊維の種類による影響もほとんど認められない。なお、各 β に対する P_M 値にはある程度のバラツキが認められるが、その原因として試験時の負荷条件やスリット先端の形状等による影響が考えられる。

しかしながら、無スリット円板の P_M 値に比べて、スリット入り円板の P_M 値の方がバラツキが小さくなる傾向については注目に値するので、今後さらに検討を加えたい。

4. 2 各種セメント硬化体の圧縮破壊靱性に関する破壊力学的検討

中央スリット入り円板が、スリット線に沿って集中圧縮荷重を受ける場合 ($\beta = 0^\circ$) には、著者らが提案した応力拡大係数 K の近似解を適用すると、最大荷重 P_M と破壊荷重 P_f に対する K_{IM} および K_{If} は、次式 (4) から求められる。

$$K_I = FP_f \sqrt{a/\pi} / Rt; F = 1.0 + 1.5(a/R)^2 \quad (4)$$

ここで、 P_f は厳密にはクラック発生時の荷重、 P_M は破断時の最大荷重である。

さて、表-2 には、試験結果の総括として、各種セメント硬化体の系列別、試験片別に円板半径 R 、円板厚 t 、円板重量 W 、円板の単位容積重量 γ 、破断時の P_M および K_{IM} 、破壊時の P_f および K_{If} を整理し、それぞれの平均値を並記した。結果として、 P 基準強度 P_M と P_f 、および K 基準強度 K_{IM} と K_{If} の間には若干の相違点が認められるが、鋼繊維の種類による K 基準強度の相違はほとんど認められない。従って、今回使用した 2 種類の鋼繊維の寸法の差程度では、コンクリートの破壊靱性値を変えるには及ばないものと考えられる。

参考文献

- (1) 北川英夫・陶山正憲・金 相哲：第 19 回材研連研究発表講演集，1975
- (2) 金 相哲・陶山正憲・北川英夫：第 19 回材研連研究発表講演集，1975
- (3) G.C. Sih et al. : Fracture - 2, 1972
- (4) 陶山正憲・北川英夫・金 相哲：土木学会研究発表講演集，1976

表-1 プレーンコンクリートと鋼繊維補強コンクリートの系列別示方配合

系列 No	コンクリートのタイプ	骨材・鋼材の種類		空気量 (%)	スランブ (cm)	重量配合比 (SSD)				
		粗骨材	鋼 繊 維			セメント	水	細骨材	粗骨材	鋼繊維
I	プレーン	A	—	4.5	18.0	1.0	0.60	3.0	3.0	—
II	コンクリート	B	—	3.6	10.0					
III	鋼繊維補強	B	ISF-25	4.7	3.0	1.0	0.60	3.0	3.0	0.26
IV	コンクリート	B	ISF-32	5.3	5.5					

表-2 各種コンクリートの系列別基準強度の比較

系列 No	Test Pieces	R (cm)	t (cm)	W (g)	γ (g/cm ³)	P_M (kg)	K_{IM} (kg/cm ^{3/2})	P_f (kg)	K_{If} (kg/cm ^{3/2})
I	5	10.09	6.60	4822	2.29	3940	50.1	3760	47.8
II	5	10.08	6.63	4846	2.30	3560	45.1	3390	43.0
III	5	10.05	6.56	4932	2.37	4490	57.6	4210	54.0
IV	4	10.07	6.55	4869	2.34	4410	56.7	4220	54.2