

水セメント比と細骨材の種類に着目したコンクリートの破壊エネルギーと破壊形式

東京都立大学大学院 学生会員 青木孝憲

東京都立大学大学院 フェロー 國府勝郎， 正会員 宇治公隆， 正会員 上野敦

1. はじめに

ガラスのように均質な材料の破壊は、蓄えられたひずみエネルギーが一挙にひび割れの形成に消費されて表面エネルギーに変換され、脆性的な性状を示す。一方、コンクリートは複合材料であり、極めて非均質である。コンクリートの破壊は、蓄えられたひずみエネルギーが一挙に表面エネルギーに変換されるのではなく、徐々に変換されていくため、粘り強く進行する。このような破壊挙動の違いを強度だけで評価するには限界がある。コンクリートに作用する様々な力と、ひび割れの発生性状の関係を、適切に把握することは、健全な構造物をつくるために非常に重要である。このため、コンクリートの組成による破壊挙動を、破壊エネルギー¹⁾というエネルギー指標の観点から検討した。具体的には、水セメント比(強度)と細骨材の種類に着目し、コンクリート内部の組成が変化したときの、破壊エネルギーの変化について検討したものである。

2. 実験概要

表-1 物理試験結果

(1) 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。使用した骨材の物理的性質を表-1に示す。コンクリートの配合は表-2に示す通りであり、碎石および砕砂を使用してW/Cを30, 50および65%に変化させ、強度を変化させたシリーズと、W/Cを50%の一定とした条件で細骨材の種類を変化させたシリーズについて試験した。高炉スラグ細骨材は急冷スラグの潜在水硬性に着目したものであり、銅スラグ細骨材は、反応機構は解明されていないが、長期強度の発現性が極めて大きいことが、これまでの実験によって明らかにされている²⁾ことに着目したものである。

種別	密度(kg/l)		吸水率 (%)	粗粒率 F.M.
	表乾	絶乾		
普通細骨材細目(n1)	2.63	2.59	1.58	1.55
普通細骨材粗目(n2)	2.65	2.62	1.06	2.87
銅スラグ細骨材細目(c1)	3.47	3.47	0.13	2.52
銅スラグ細骨材粗目(c2)	3.50	3.49	0.17	3.31
高炉スラグ細骨材細目(b1)	2.81	2.80	0.28	1.43
高炉スラグ細骨材粗目(b2)	2.81	2.80	0.28	3.22

高炉スラグ細骨材は急冷スラグの潜在水硬性に着目したものであり、銅スラグ細骨材は、反応機構は解明されていないが、長期強度の発現性が極めて大きいことが、これまでの実験によって明らかにされている²⁾ことに着目したものである。

(2) 実験方法

試験項目として、圧縮強度試験、静弾性係数測定試験、引張強度試験および破壊エネルギー試験を行った。破壊エネルギー試験は、切欠き梁の三点曲げの支間中央のたわみを測定し、荷重-変位曲線を求め、その曲線によって囲まれる面積と供試体の自重による影響を考慮して破壊に至るエネルギーを求め、破断面の投影面積でこれを除すことにより、破壊エネルギーを計算した。また、破断面の凹凸をレーザー変位計で測定し、合成することにより、破断面のプロファイル長さを求め、それを破断面の投影長さで除した値を凹凸度とした。

3. 結果および考察

(1) 強度

圧縮強度と引張強度、圧縮強度とヤング係数の関係を図-1、及び2に示す。

(2) 脆度係数

脆度係数は圧縮強度を引張強度で除した値であり、この値が大きいほど脆性的であるとされている。図-3より、圧縮強度が大きいほど、脆度係数は増大する傾向が認められる。

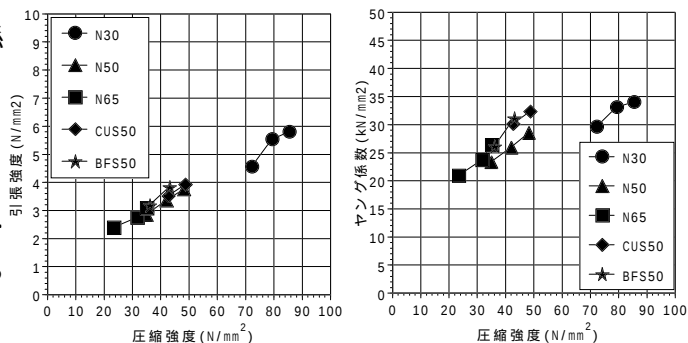


図-1 圧縮強度と引張強度

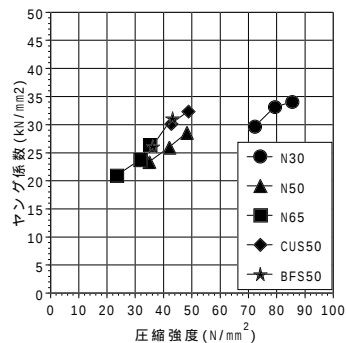


図-2 圧縮強度とヤング係数

キーワード：破壊エネルギー、特性長さ、凹凸度

連絡先：〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1 TEL 0426-77-1111 FAX 0426-77-2772

(3) 破壊エネルギー (G_f)

圧縮強度と G_f の関係は図-4に示すとおりである。細骨材の種類の違いによる破壊エネルギーに顕著な違いは認められなかった。本研究では圧縮強度が30N/mm²程度の場合、 G_f が最大になっている。一方、圧縮強度が40N/mm²程度以上の領域では、圧縮強度が増加しても G_f はあまり変化していない。圧縮強度が40N/mm²程度以上の領域では、ひび割れは骨材を貫通して一挙に進展する脆性的破壊性状を示した。これは、マトリックス強度が骨材強度と同等となっているためと考えられる。一方、圧縮強度40N/mm²程度以下の領域においては、マトリックス強度が骨材強度に比較して小さいことにより、ひび割れが骨材の界面に沿って進展する破壊となった。このようにひび割れが骨材界面を進展する場合、ひび割れの実面積が増大するために消費されるエネルギー G_f が大きくなると考えることができる。また、圧縮強度が20N/mm²程度するとき、ひび割れは骨材界面を進展すると思われるが、マトリックス強度が小さく、最大荷重後の軟化過程も急激に減少し、 G_f が小さくなったものと考えられる。

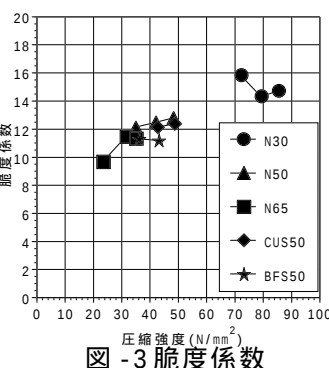


図-3 脆度係数

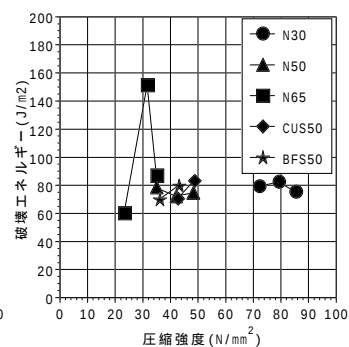


図-4 破壊エネルギー

(4) 凹凸度

凹凸度は、この値が大きい程、破断面の実面積が大きくなることを示している。図-5は圧縮強度と凹凸度との関係である。圧縮強度が増加すると、凹凸度は減少する傾向が認められる。

(5) 特性長さ

コンクリート内部に蓄えることができる内部ひずみエネルギーの指標は $E\epsilon^2$ で与えられる。そして、引張破壊であることと、コンクリートのヤング係数とを考慮すれば、この指標は f_t^2/E で表される。特性長さ l_{ch} は単位面積のひび割れを形成するために必要な G_f をひずみエネルギーで除した値であり、次式で表される。

$$l_{ch} = G_f / E \epsilon^2 = EG_f / f_t^2$$

ここに、 l_{ch} (mm), G_f (J/m²), E (kN/mm²) ϵ ($\times 10^{-6}$), f_t (N/mm²) とする。

この値は長さの次元をもち、この値が小さいほど、脆性的に破壊する挙動を示すことになる。

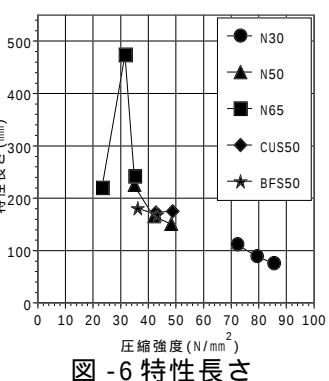


図-6 特性長さ

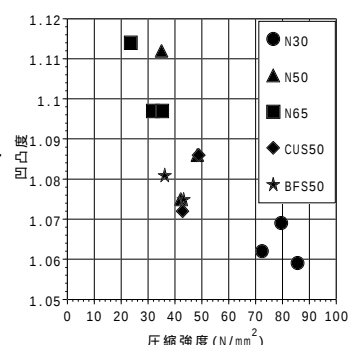


図-5 圧縮強度と凹凸度

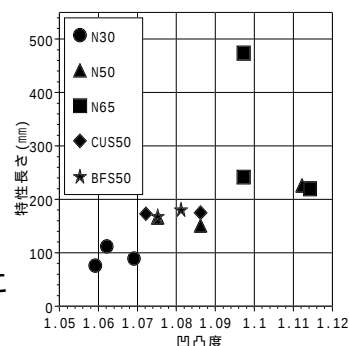


図-7 凹凸度と特性長さ

圧縮強度と特性長さの関係を示す図-6は、図-4に比較して、高強度領域における脆性的性状をよく表現している。また、凹凸度と特性長さの関係は図-7に示すとおりであり、概ね凹凸度が大きいほど特性長さが大きい傾向があることが示された。細骨材の種類の違いによる特性長さに、顕著な違いは認められなかった。

4. まとめ

- (1) 破壊エネルギーに大きく関与しているのは、マトリックス強度と骨材強度とのバランスであり、ひび割れがどのように進展するかによって破壊エネルギーが変化する。
- (2) コンクリートの破壊エネルギーは、コンクリートの圧縮強度よりもむしろひび割れの伝播経路で形成されるひび割れ面の凹凸度に支配されており、 EG_f/f_t^2 で表される特性長さは破壊性状の評価に有効である。
- (3) 高強度のコンクリートは脆性的な破壊挙動を示すが、そのような破壊を起こさせないようにするためには、骨材強度、界面の付着強度を増大させる必要があるといえる。
- (4) 細骨材の種類の違いによる脆度係数、破壊エネルギー、特性長さ、凹凸度に顕著な変化はなかった。

【参考文献】1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書

2) 土木学会：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針(コンクリートライブラリー92)