

論文 砕石および川砂利コンクリートの二軸破壊特性

石 黒 覚*¹

要旨: 二軸応力 (圧縮 - 引張) 下における砕石および川砂利コンクリートの破壊特性を調べるために、くさび挿入法に基づくモード I 破壊試験を実施した。荷重 - 開口変位の計測結果から破壊エネルギーを算定するとともに、多直線近似解析法により引張軟化特性の推定を行った。二軸応力下における砕石および川砂利コンクリートの破壊エネルギーは、圧縮強度に対する応力比が 0.15, 0.3 および 0.45 の場合では一軸応力下のそれに比べて低下し、圧縮応力比が 0.6 では同等かそれ以上に増加した。また、多直線近似解析法による推定結果から、引張軟化曲線の形状および軟化開始点応力は、圧縮応力比の大きさによって相違することがわかった。

キーワード: コンクリート, ひび割れ, 破壊エネルギー, 引張軟化曲線, 二軸応力, 破壊力学

1. はじめに

コンクリートの力学特性は、圧縮強度、引張強度および静弾性係数など強度や変形特性に関するものが一般的である。近年、繊維補強コンクリートや高強度コンクリートなど種々の力学特性を有する新しいコンクリート材料が開発され、強度特性に加えて破壊特性の評価も重要になってきた。

コンクリートの破壊特性には種々のものが提案されており、これらのうち破壊エネルギーや引張軟化曲線などの破壊パラメータがコンクリートの破壊力学において有望視されている。これらの破壊パラメータを求める試験法には、切欠き梁の 3 点曲げ試験法、くさび挿入試験法、CT (コンパクトテンション) 試験法および一軸引張試験法などが用いられており、これらの試験法では曲げあるいは一軸応力下におけるコンクリートの破壊特性が求められている。実際のコンクリート構造物では二軸あるいは多軸応力状態となっている場合が一般的であるため、ここでは二軸応力 (圧縮 - 引張) 下におけるコンクリートの破壊特性に着目し、実験および解析の両面から研究を行った。

二軸応力下におけるコンクリートの破壊特性の研究は、Tschegg らによるくさび挿入試験法に基づく実験的研究^{1,2)}があるものの、研究事例は少ないのが現状である。本研究では、Tschegg らが開

発したくさび挿入法に基づく二軸破壊試験装置を作製し、砕石および川砂利コンクリートを対象として破壊試験を実施した。さらに、多直線近似解析法を適用して二軸応力下における引張軟化特性の推定を試みた。本論文では二軸破壊試験によって求めた各種破壊パラメータについて考察した。

2. 実験概要

2.1 供試体の形状寸法と載荷方法

コンクリート供試体の形状寸法を図-1(a)に示す。供試体は 150×150×130mm の直方体を用いた。試験直前にコンクリートカッターを用いて供試体中央部に幅 2mm、深さ 40mm (リガメント高さ 90mm) の切欠きを設け、試験時にひび割れがこの切欠き先端から発生するようにした。

また、供試体への二軸載荷 (圧縮 - 引張) 方法は、図-1(b)に示すように、載荷版を介して鉛直方向に圧縮荷重 F_c を作用させ、同時に切欠きを含む鉛直面に沿っての鋼製のくさびを挿入させることにより、水平方向の引張荷重 F_h を作用させるものとした。

2.2 試験装置の概要

くさび挿入法に基づく二軸破壊試験装置の概略を図-2(a)および(b)に示す。コンクリート供試体への圧縮荷重は、容量 400kN の油圧ジャッキを用

*1 三重大学助教授 生物資源学部 農博 (正会員)

いて、左右それぞれ 3 個の油圧シリンダを介して与えた。また、くさびへの荷重は電動式一軸圧縮試験機を用い、その荷重速度は 1mm/min とした。

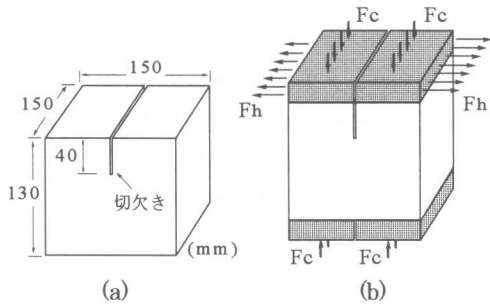


図-1 供試体の形状寸法と二軸荷重状態

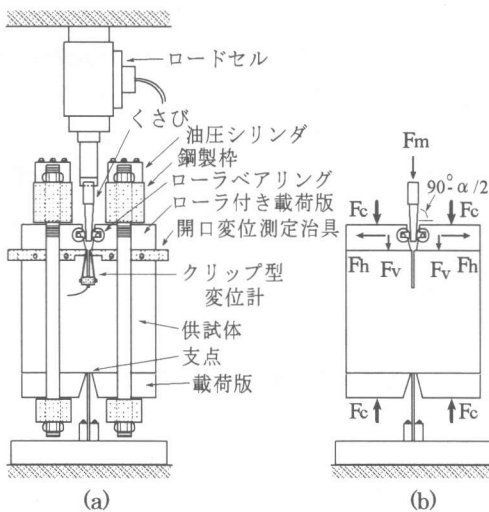


図-2 くさび挿入法による二軸破壊試験装置

二軸破壊試験では、コンクリート供試体を幅 3mm の支点上に載せた状態で上下の荷重版を介して所定の圧縮荷重を与え、その後、鋼製のくさびをローラ付き荷重版のローラベアリングに接するようにして鉛直上方から挿入させた。一方、一軸破壊試験では、試験直前に供試体上部の荷重面に厚さ 6mm の鋼板を瞬間接着剤を用いて貼り付け、この鋼板にローラ付き荷重版を固定し、圧縮荷重の有無以外は二軸破壊試験と同じになるようにした。なお、上部荷重版とコンクリート供試体の間には厚紙を挿入し、また、下部荷重版と供試体の間にはプラスチック製のシートを挿入した。

さらに二軸荷重装置は、これよりも一回り大きい鋼製フレーム内に左右上部の 2 箇所においてスプリングで吊って支点上に保持し、試験時に装置などの自重が破壊に影響しないようにした。このとき、コンクリート供試体には、図-2(b)に示すように油圧シリンダから圧縮荷重 F_c 、くさびからローラ付き荷重版を介して水平方向荷重 F_h および鉛直方向荷重 F_v が作用する。このうち、圧縮荷重 F_c は油圧ジャッキの目盛りを読み取ることにより、また、試験機からくさびに荷重された荷重 F_m は、容量 10kN のロードセルにより計測した。一方、水平方向荷重 F_h は、くさびの角度 α と荷重 F_m から次式により算定した。

$$F_h = F_m / [2 \tan(\alpha/2)] \quad (1)$$

開口変位は、切欠き口の開口変位を測定するものとし、図-2(a)に示すようにコンクリート供試体上部に開口変位測定治具を取付け、容量 5mm のクリップ型変位計を用いて測定した。また、開口変位は、供試体の前面と後面の 2ヶ所において測定し、それらの平均値により表すものとした。なお、破壊エネルギーの算定に用いた荷重点の開口変位は、支点から変位計取付け位置および荷重点の位置までの距離に比例配分させて計算により求めた。また、これら荷重 - 開口変位の計測データは、データロガーを用いて 1 秒間隔で記録した。

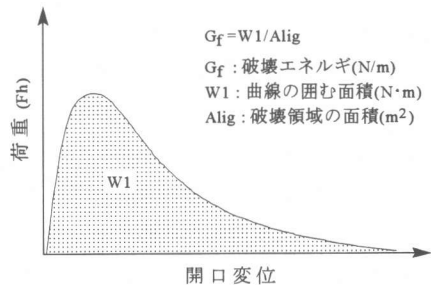


図-3 破壊エネルギーの算定方法

2.3 破壊エネルギーの算定

コンクリートの破壊エネルギーは、RILEM から提案されたモード I 破壊試験における破壊エネルギーの定義に従い、これをくさび挿入試験結果に適用することにより算定した(図-3 参照)。

2.4 曲げ引張強度の算定

切欠きを有するコンクリート供試体の曲げ引張強度 σ_b を次式により算定した²⁾。

$$\sigma_b = M / W_{lig} + F_{hmax} / A_{lig} \quad (2)$$

$$M = y \cdot F_{hmax} \quad (3)$$

$$W_{lig} = (B_{lig} \cdot H_{lig}^2) / 6 \quad (4)$$

ここで、 F_{hmax} は荷重 (F_h) の最大値、 M は最大曲げモーメント、 y はリガメントの中心から載荷点までの距離、 A_{lig} はリガメントの面積、 W_{lig} は切欠き先端における断面係数、 B_{lig} および H_{lig} は、それぞれ、リガメントの幅および高さを表す。

2.5 コンクリートの種類および試験条件

破壊試験に用いたコンクリートの配合と主な力学特性を表-1に示す。コンクリートは川砂利(密度2.66)と川砂を使用したもの、碎石(密度2.84)と川砂を使用したものの2種類を作製した。それぞれNGおよびCGと記す。スランブは7~10cm、空気量4~6%の配合とした。供試体数は4個とし、試験材令28日まで水中養生を行った。

二軸破壊試験における圧縮荷重の大きさは、コンクリートの圧縮強度に対する比率で0.0(一軸応力)、0.15、0.3、0.45および0.6になるような5ケースの圧縮応力比とした。以下、各圧縮応力比の供試体は、種類を表すNGおよびCGの後ろに応力比率(%)の数値を付けて記述した。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-開口変位

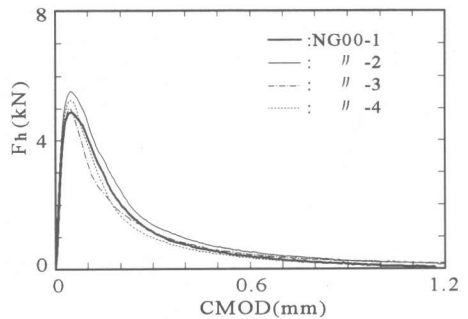
図-4(a)、(b)および(c)は、それぞれNG00、NG30およびNG60の荷重(F_h) - 開口変位(CMOD)の計測結果を示したものである。同様に、図-5(a)、(b)および(c)は、それぞれCG00、CG30およびCG60の荷重-開口変位の計測結果を示している。これらの試験結果においては、ひび割れの進展に伴う急激な荷重低下や破壊現象は認められず、最大荷重以降の軟化領域においても安定して荷重-開口変位を計測できた。

3.2 破壊エネルギー

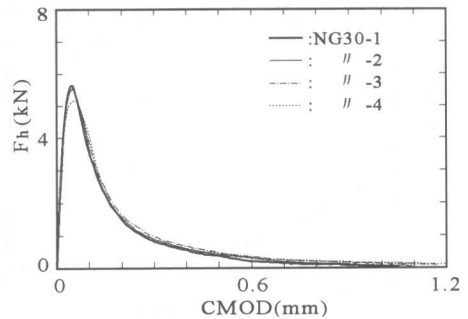
コンクリートの破壊エネルギー (G_f) と圧縮応力比の関係を図-6に示す。この結果によると、

表-1 コンクリートの配合および力学特性

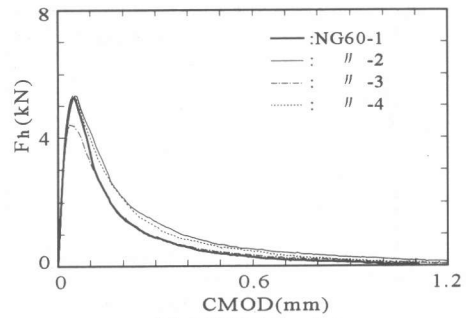
種類	NG	CG
粗骨材の種類	川砂利	碎石
粗骨材の最大寸法 (mm)	20	20
水セメント比 (%)	60	60
細骨材率 (%)	45	45
単位水量 (kg/m ³)	168	168
単位セメント量 (kg/m ³)	280	280
静弾性係数 (GPa)	24.9	30.7
引張強度 (MPa)	2.30	2.59
圧縮強度 (MPa)	24.7	27.7



(a) 圧縮応力比 : 0.0



(b) 圧縮応力比 : 0.3

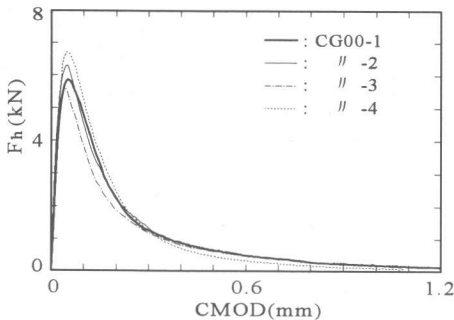


(c) 圧縮応力比 : 0.6

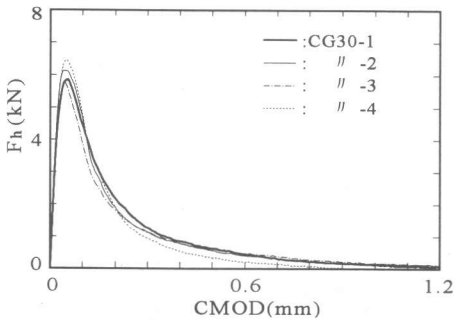
図-4 荷重(F_h) - 開口変位(CMOD)の計測結果 (川砂利コンクリート)

圧縮応力比が 0.15, 0.3 および 0.45 の平均破壊エネルギーは, NG および CG とともに一軸応力下のそれに比べて減少する傾向が認められた。また, 圧縮応力比が 0.6 の場合の平均破壊エネルギーは, 一軸応力下のそれと同等あるいは増加している。このような破壊エネルギーと圧縮応力比の関係は, Tschegg らの試験結果においても示されており²⁾, これは, 破壊進行領域の分布や進展状況が, 圧縮応力比の大きさによって異なるためと推察されている。

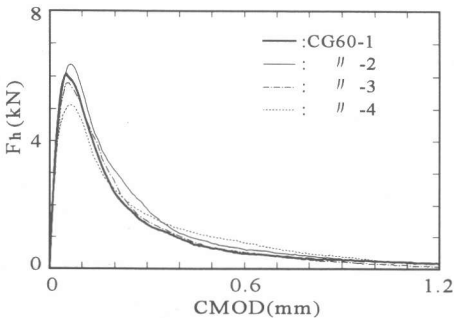
また, コンクリートの破壊エネルギーは, 圧縮



(a) 圧縮応力比: 0.0



(b) 圧縮応力比: 0.3



(c) 圧縮応力比: 0.6

図-5 荷重(F_h) - 開口変位(CMOD)の計測結果(砕石コンクリート)

応力比が 0.0~0.6 の範囲では CG (砕石) のほうが NG (川砂利) のそれに比べて 6~41%大きくなっており, 骨材の種類が破壊エネルギーに及ぼす影響は, 既往の研究結果と同様であった^{2,5)}。

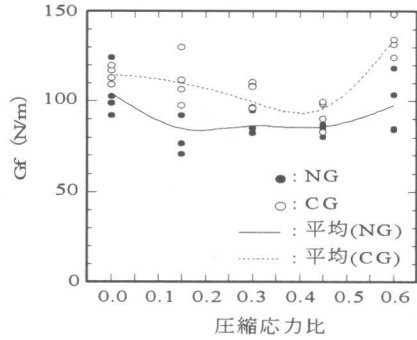


図-6 破壊エネルギー(G_f)と圧縮応力比の関係

3.3 曲げ引張強度

切欠きを有するコンクリートの曲げ引張強度と圧縮応力比の関係を図-7 に示す。一軸応力下の NG00 および CG00 の平均曲げ引張強度は 3.00MPa および 3.52MPa となり, それぞれ, 表-1 に示した割裂引張強度の 1.30 および 1.36 倍となった。切欠きのないコンクリートの曲げ引張強度と割裂引張強度の比は 1.6~2.0 倍であり, 本試験結果はこれよりも若干小さい値である。

切欠きのないコンクリートの二軸(圧縮-引張)強度試験結果では, 圧縮応力比の増加に伴い連続的に引張強度の低下することが報告されている³⁾。本試験結果における NG の傾向はこれと少し異なるが, CG では大体同様の傾向を示している。

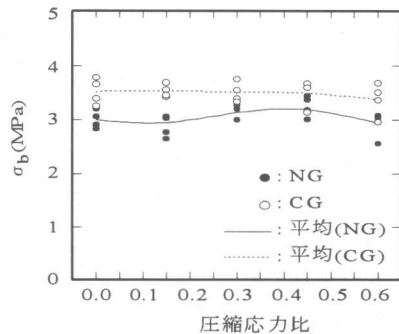


図-7 切欠きコンクリートの引張強度(σ_b)と圧縮応力比の関係

3.4 破壊性状

図-8 は NG 供試体における代表的なひび割れ破壊性状を示している。ここで、実線および点線は、目視により観察した供試体の前面および後面における破壊面を表している。ひび割れは、ほぼ切欠き先端から支点に向かって進展している。また、NG30 あるいは NG45 における破壊面は、NG00 に比較してフラットになる傾向が認められた。このことが前者の破壊エネルギーが小さくなった原因の一つと考えられる。

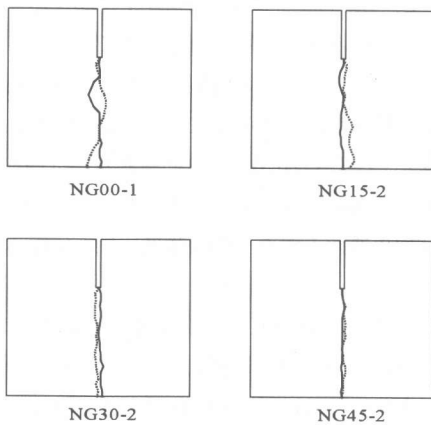


図-8 供試体における代表的なひび割れ性状

4. 引張軟化曲線の解析

4.1 解析法の概要

引張軟化曲線の解析には、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から提案された多直線近似解析法を適用した⁶⁾。その解析手順は、1) 計測した荷重 - 開口変位曲線の平均化および平滑化、2) 弾性係数 E_c の推定、3) 軟化開始点応力 (引張強度 F_t) の推定および 4) 引張軟化曲線の推定などの作業から構成されている。ここで、計測した荷重 - 開口変位曲線の平均化および平滑化は、計測データをスプライン関数で補間し、一定の刻み幅で補間結果を出力したものを解析用の荷重 - 開口変位曲線とした。また、ここでは多直線近似解析法として、二軸応力状態を考慮した有限要素法解析を用いた⁷⁾。

4.2 解析結果および考察

図-9(a), (b)および(c)は、それぞれ NG00, NG30

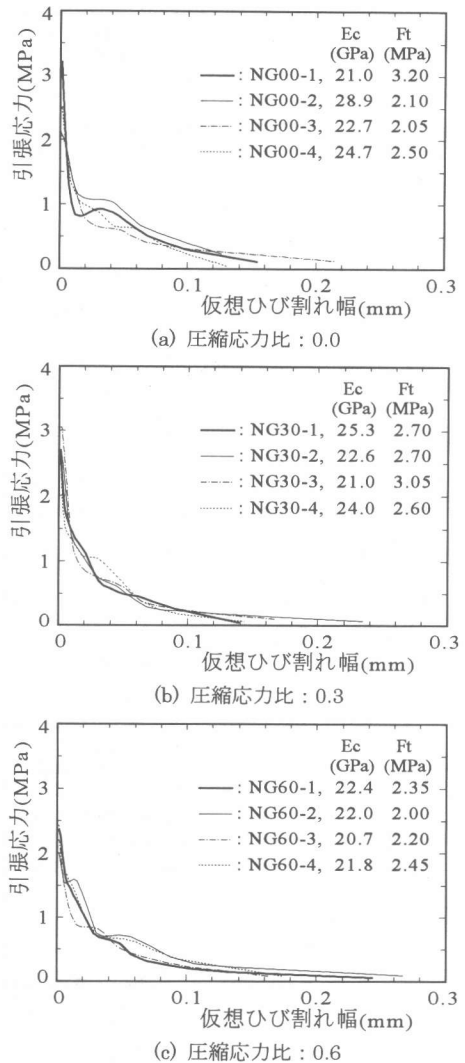
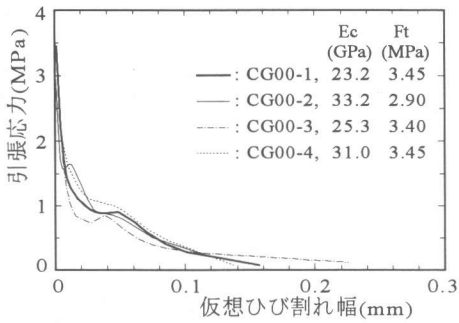


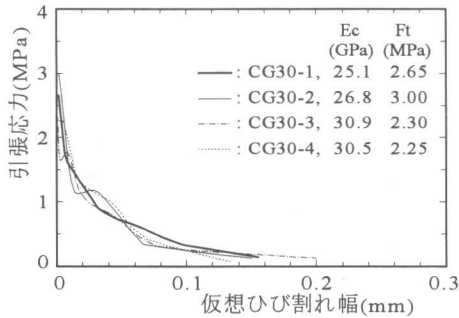
図-9 引張軟化曲線の推定結果 (川砂利コンクリート)

および NG60 の引張軟化曲線の推定結果を示す。また、同図には弾性係数 E_c 、引張強度 F_t の推定結果も表す。同様に、図-10(a), (b)および(c)は、CG00, CG30 および CG60 の推定結果を示す。

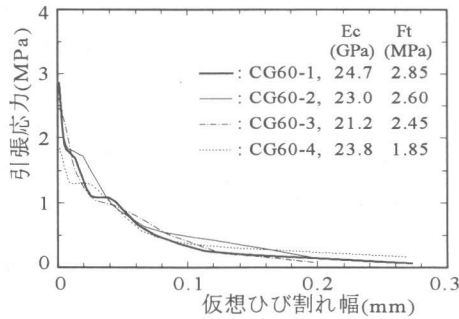
これらの推定結果から、二軸応力下におけるコンクリートの引張軟化曲線は、各圧縮応力比で異なった形状を示した。例えば、圧縮応力比 0.6 の引張軟化曲線は、圧縮応力比 0.0 (一軸応力状態) に比べて軟化開始点応力 (引張強度 F_t) が低下し、曲線の後半部分の引張応力が大きくなる。これは、骨材のかみ合い効果による伝達応力が増加してい



(a) 圧縮応力比: 0.0



(b) 圧縮応力比: 0.3



(c) 圧縮応力比: 0.6

図-10 引張軟化曲線の推定結果
(碎石コンクリート)

表-2 弾性係数 Ec および引張強度 Ft の推定値

応力比		0.0	0.15	0.30	0.45	0.60
Ec (GPa)	NG	24.3 (1.00)	24.9 (1.02)	23.2 (0.96)	22.2 (0.91)	21.7 (0.89)
	CG	28.2 (1.00)	27.9 (0.99)	28.3 (1.01)	25.1 (0.89)	23.2 (0.82)
Ft (MPa)	NG	2.46 (1.00)	2.59 (1.05)	2.76 (1.12)	2.85 (1.16)	2.25 (0.91)
	CG	3.30 (1.00)	3.13 (0.95)	2.55 (0.77)	2.42 (0.73)	2.44 (0.74)

*括弧内の数値は、圧縮応力比 0.0 の場合の値を 1.00 としたときの比率を表している。

ることを示している。さらに、伝達応力が零となる限界ひび割れ幅は大きくなる傾向を示している。

また、弾性係数 Ec の推定値は圧縮応力比の増加に伴い低下し(表-2 参照)、既往の試験結果と同じ傾向を示した⁴⁾。そしてまた、引張強度 Ft の推定値と圧縮応力比の関係は、曲げ引張強度の試験結果と同様であった。このことから、本解析法は妥当な推定結果を与えているものと考えられる。

5. まとめ

本研究の結果は、以下のようにまとめられる。

- くさび挿入法に基づくモード I 破壊試験により、二軸応力(圧縮-引張)下におけるコンクリートの破壊挙動を安定して計測できた。
- コンクリートの破壊エネルギーは、圧縮応力比 0.15, 0.3 および 0.45 では一軸応力下に比べて減少し、圧縮応力比 0.6 では同等あるいは増加した。
- 二軸応力下における引張軟化曲線の形状および軟化開始点応力(引張強度)は、圧縮応力比の大きさによって相違した。
- 碎石コンクリートの破壊エネルギーは、圧縮応力比 0.0~0.6 の範囲においては川砂利コンクリートのそれに比べて 6~41% 大きくなった。

参考文献

- E.K.Tschegg, H.Kreuzer and M.Zelezny : Fracture in Concrete under Biaxial Loading - Numerical Evaluation of Wedge Splitting Test Results - ,Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-1, pp.455-460,1992
- E.K.Tschegg, M.Elser and S.E.Stanzl-Tschegg : Biaxial Fracture Tests on Concrete - Development and Experience, Cement and Concrete Composites, 17, pp.57-75, 1995
- Kupfer, H. K.Hilsdorf, and H. Rusch : Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, J. of Am. Concr. Inst., Vol. 66, No.8, pp. 656-666, 1969
- 岡村 甫・前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則,技報堂出版,pp.74-83,1991
- 石黒 覚: 各種骨材を用いたコンクリートの破壊エネルギーと引張軟化曲線, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.139-144, 1998
- 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, 多直線近似法による引張軟化曲線の推定マニュアル, 日本コンクリート工学協会, 2000
- 石黒 覚: 二軸応力下におけるコンクリートの引張軟化曲線, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.33-38, 1997