

論文 コンクリートのバイリニア型引張軟化構成則の簡易評価方法について

橋高義典*1・中村成春*2・三橋博三*3

要旨: 破壊エネルギー G_F およびバイリニア型引張軟化曲線の解析に関わる既往の研究を概括し、バイリニア評価パラメータと各種強度評価値との関係を明らかにした。特に構造解析等の数値解析において、応用範囲が広い CEB-FIP モデルコード提案式の有効性を検討した。その結果、圧縮強度に基づく引張強度、破壊エネルギー等の推定は、高強度域においては本研究での回帰分析結果がより精度が高いこと、バイリニアブレイクポイントの決定には簡便な方法が有効であることなどを指摘し、汎用性のあるバイリニア型引張軟化曲線の簡易評価方法を考案した。

キーワード: 引張軟化曲線、破壊エネルギー、引張強度、限界仮想ひび割れ幅、圧縮強度

1. はじめに

コンクリートの引張軟化特性は、構造物の数値解析における材料構成則、損傷領域の定量的な評価、破壊力学パラメータなどに広く応用でき、従来の圧縮強度・引張強度とともに重要な強度特性値となる。しかしながら、その定量的な評価法には多くの提案があり、国際的に共通の簡易評価方法が望まれている。近年、CEB-FIP モデルコード 1990¹⁾ において、主にコンクリートの圧縮強度に基づいたバイリニア型引張軟化曲線の簡易評価方法（以下、CEB 法）が提案された。特に、構造解析等の数値解析においては、バイリニア型の構成関数が簡便で、かつ既存の圧縮強度試験法が適用できることでその応用範囲も広い。しかしながら、その推定精度、および近年の新材料、高強度材料等への適応性についてはあまり検討されていない。

本研究は、バイリニア型引張軟化曲線の解析に関わる既往の研究を概括し、各種強度試験値と評価パラメータとの関係を明らかにする。特に CEB 法に示される圧縮強度からの推定式の推定精度について検討し、より汎用性のある評価方法についても言及する。

2. バイリニア型引張軟化曲線の評価概要

バイリニア型引張軟化曲線の推定方法とは、バイリニア型（図-1）を規定する軟化開始応力 f_t 、ブレイクポイント（折り曲がり点）の仮想ひび割れ幅 w_1 とその時の結合応力 s_1 、限界仮想ひび割れ幅 w_c の 4 パラメータの同定法である。最も精度が高い逆解析による評価法は、これらパラメータを種々変化させ、荷重変位解析を行い、実験で得られた荷重変形関係との最小二乗近似解析により各パラメータの最適値を求める²⁾。この場合には、ひびわれ進展解析プログラムと効率的な最小二乗パラメータ決定プログラムが必要となる。ここで、引張軟化曲線

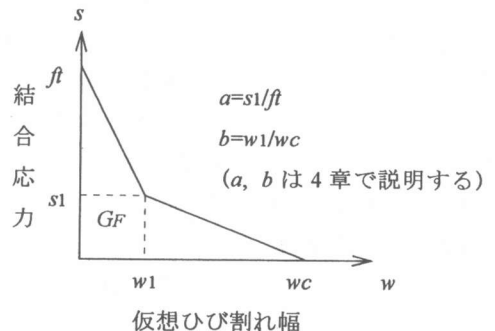


図-1 バイリニア型引張軟化曲線パラメータ

*1 東京都立大学助教授 工学部建築学科 工博（正会員）

*2 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博（正会員）

*3 東北大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

で囲まれる面積は、単位リガメント部を破壊する時に消費されるエネルギーとなるが、RILEM 推奨の破壊仕事法により求めた破壊エネルギー G_F ³⁾ に近似すると仮定することで、推定する未知数を減らすことができる。このことを利用し、三橋・野村⁴⁾は、破壊エネルギー G_F の計測結果と、すでに標準化されている一般的な強度測定値等から各パラメータを推定する簡易評価法を提案し、また、CEB 法の圧縮強度と骨材最大寸法からの推定方法は最も簡便である。

3. 各力学特性パラメータの検討

コンクリートの破壊パラメータに関する文献 (Appendix 1 参照) を調査し、パラメータ間の関係を考察した (G_F 値は 3 点曲げ試験による)。

3.1 軟化開始応力 f_t

本質的な軟化開始応力 f_t は寸法依存性があるので一意的に決めることはあまり意味がない。また最近の調査結果⁵⁾から、多直線近似等で求めた正確な引張軟化曲線の場合には f_t が異なっても荷重変位の解析結果は変化しない。ただしパイリニアの場合は、第一勾配に影響するので何らかの標準化が必要となる。既往の研究の多くは割裂引張強度 f_{st} を適用している。CEB 法では圧縮強度から割裂引張強度を推定している。図-2 に文献より得られた圧縮強度と引張強度との関係を示す。引張強度は、割裂引張強度 f_{st} と直接引張強度 f_{dt} の 2 種類を示した。各々、圧縮強度 f_c との回帰分析を実行した結果、 f_c が増加するほど f_{st} と f_{dt} との強度差が大きくなる。CEB 法では f_{st} をやや高めに評価し、むしろ f_{dt} と一致している。NewRC 式⁶⁾は調査結果の f_{st} と f_{dt} との中間部にある。

3.2 ヤング係数 E

ヤング係数 E はパイリニア型の簡易推定には本質的に関連しないが、破壊解析や荷重変位解析には弾性範囲での構成則となる E の推定が重要となる。図-3 に圧縮強度とヤング係数との関係を示す。ここでは、骨材の補正係数、混和材の補正係数および単位容積質量等の補正

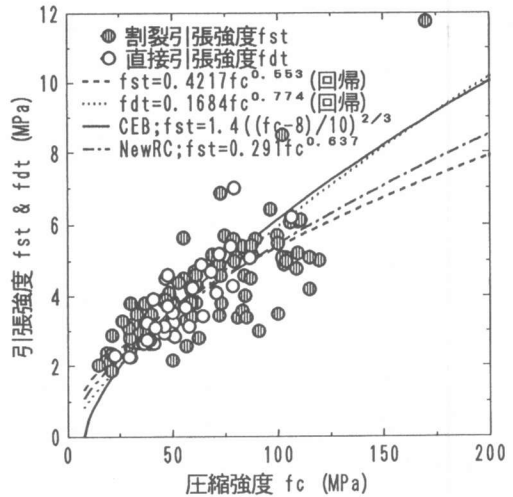


図-2 圧縮強度と引張強度との関係

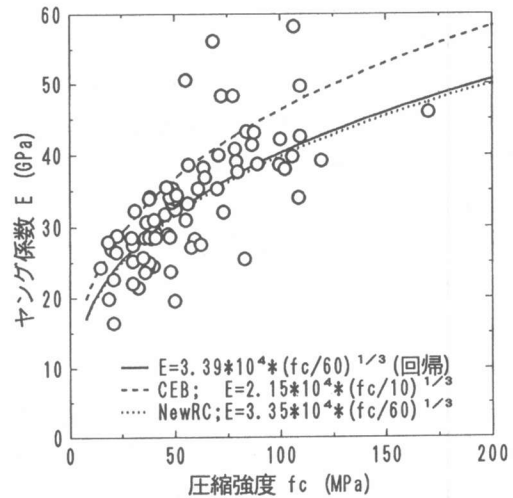


図-3 圧縮強度とヤング係数との関係

項は考えていない。CEB 法では E をやや大きめに評価する傾向がある。本調査の回帰分析結果は NewRC 式⁶⁾とほぼ一致した。なお、切欠き梁の 3 点曲げによる RILEM の破壊エネルギー試験での荷重変位関係の初期勾配から E を求める方法もある⁷⁾。

3.3 破壊エネルギー G_F

RILEM の破壊エネルギー G_F 試験法が提案されてから 10 年以上経過しているが、 G_F 評価は非常にばらつくことが指摘されている。しかしながら、パイリニア型の簡易推定には G_F 評価が不可欠である。CEB 法でも f_c からの G_F 推定式 (式(1)) によりパラメータを規定している。

図-4に圧縮強度と破壊エネルギーとの関係を骨材最大寸法 d_{max} ごとに示す。調査標本数が増加するほど G_F はばらついていくが、いずれの d_{max} でも G_F は、 f_c が 100MPa 以降で急激な増加は見られず緩やかな増加か頭打ちの傾向となる。100MPa 程度までは CEB 法は、ほぼ平均的な評価となっている。本研究では、リガメント長さ 50mm の調査結果について、高強度域を含めた回帰分析を各 d_{max} ごとに行い、 d_{max} に関する補正係数 α_F (回帰係数はより簡潔に修正した) および $1/3$ 乗関数による G_F 評価

式(式(2))を新たに求めた(図-4)。

$$G_F = \alpha_F \cdot (f_c/10)^{0.7} ; \alpha_F = 1.25 \cdot d_{max} + 10 \quad (1)$$

$$G_F = \alpha_F \cdot f_c^{1/3} ; \alpha_F = 10 \cdot d_{max}^{1/3} \quad (2)$$

4. バイリニア型引張軟化パラメータの検討

バイリニア型を規定するには、結合応力がゼロとなる限界仮想ひび割れ幅 w_c ならびに、軟化開始応力 f_t とブレイクポイントにおける結合応力 s_1 との結合応力比率 $a (=s_1/f_t)$ を決定しなければならない。そこで、国内外の調査文献(Appendix 2 参照)より、直接引張試験、CT

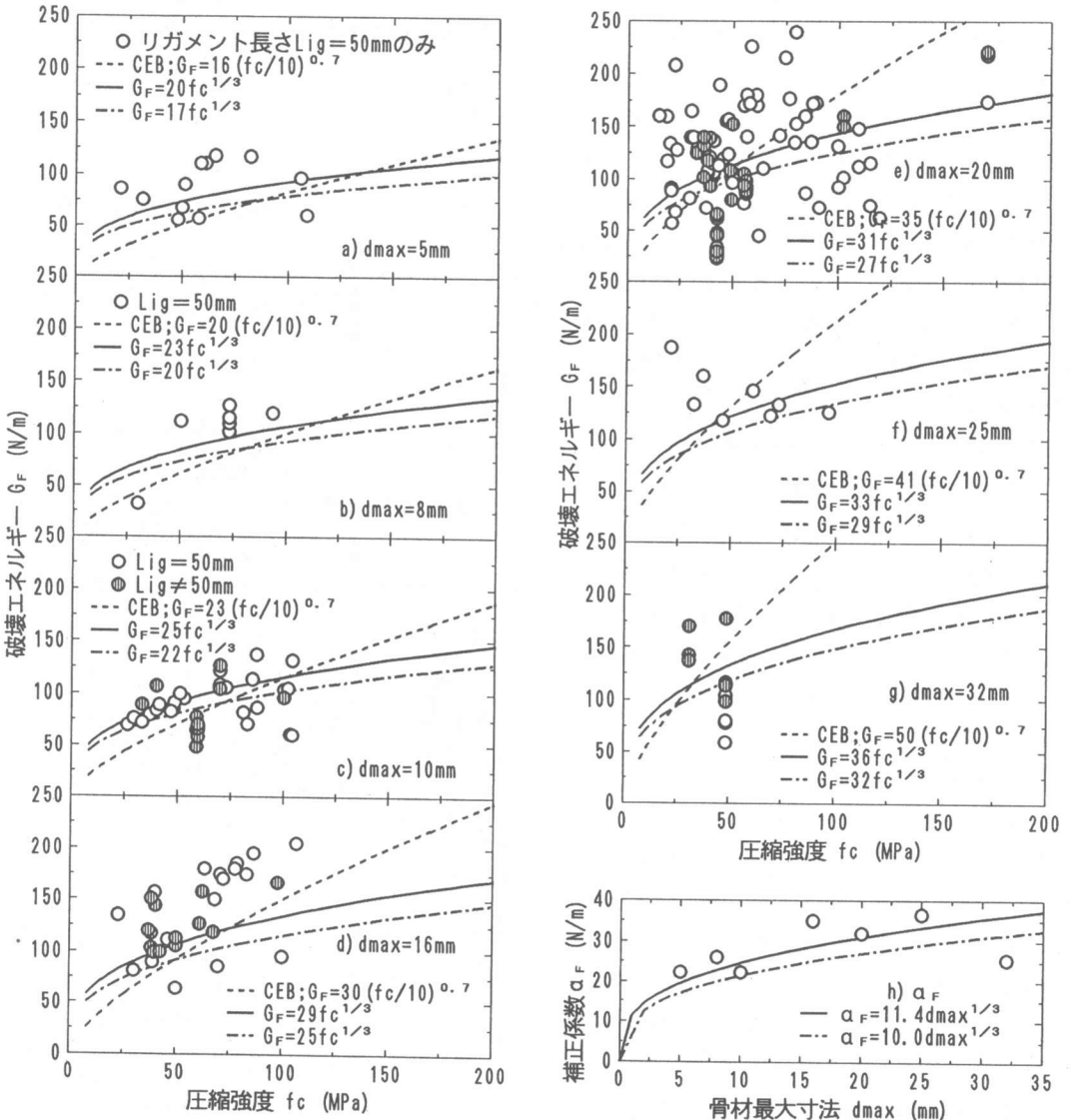


図-4 圧縮強度と破壊エネルギーとの関係

試験，3点曲げ試験から，バイリニア型引張軟化曲線を逆解析したパラメータ結果を調査した。

図-5に圧縮強度とブレイクポイントにおける結合応力比率 a との関係を示す。図中には文献4)の三橋らの分析結果も表示した。調査結果は， $d_{max} = 5 \sim 10$ mmの骨材寸法の小さなものが若干低い値を示すようであるが，三橋らの結果のように骨材寸法ごとに分類される傾向は認められない。CEB法では f_c に関わらず $a = 0.15$ 一定としている。図中には全データの平均値 $a = 0.218$ を示した。

図-6に骨材最大寸法と限界仮想ひび割れ幅 w_c を定める補正係数 $\beta_F (=f_t \cdot w_c / G_F)$ との関係を示す。図中にはCEB法の β_F も表示した。このCEB値を回帰分析すると式(3)となる。

$$\beta_F = 9 - 0.125 \cdot d_{max}; a + b = 2 / \beta_F \quad (3)$$

ここで， b は w_c とブレイクポイントにおける仮想ひび割れ幅 w_1 との比率 ($b = w_1 / w_c$) を表す。CEB法では d_{max} が大きくなると β_F を小さくしているが，本調査の範囲内では明確な関係は認められない。図中には全データの平均値 $\beta_F = 5.385$ を示した。

以上の分析結果より，CEB提案のパラメータをより簡便にし， $a = 0.2$ 一定， $\beta_F = 5$ 一定 ($b = 0.2$) の1/5モデルを提案する。CEB法に示される骨材最大寸法による荷重変位曲線の形状の変化は， G_F の変化による w_c に反映されると考え，バイリニア形状は一定としている。従って，各パラメータ算定は式(4)～式(6)となる。

$$s_1 = 0.2 \cdot f_t \quad (4)$$

$$w_1 = 2 \cdot (G_F / 1000) / f_t - 0.2 \cdot w_c \quad (5)$$

$$w_c = 5 \cdot (G_F / 1000) / f_t \quad (6)$$

図-7に，これらパラメータを用いて得られる引張軟化曲線を示す。図中には，CEB以外に提案された他の研究機関のモデルも比較のため表示した。六郷の1/4モデルや本研究提案の1/5モデル，およびCEBの $d_{max} = 32$ mmモデルのブレイクポイントは，Hordijkの曲線モデルを近似するような位置にあり，特に1/5モデルはほぼ中間部に位置している。

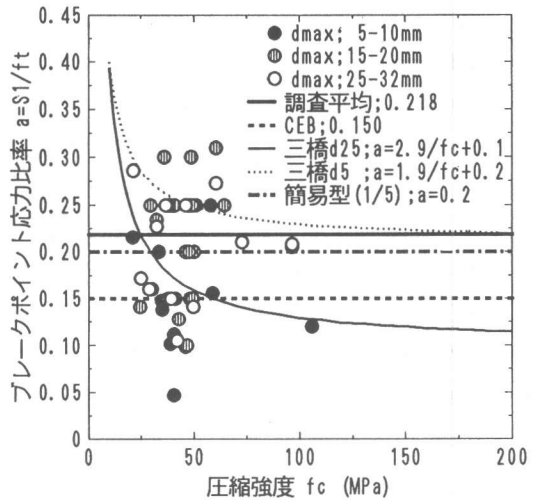


図-5 圧縮強度と結合応力比率 a との関係

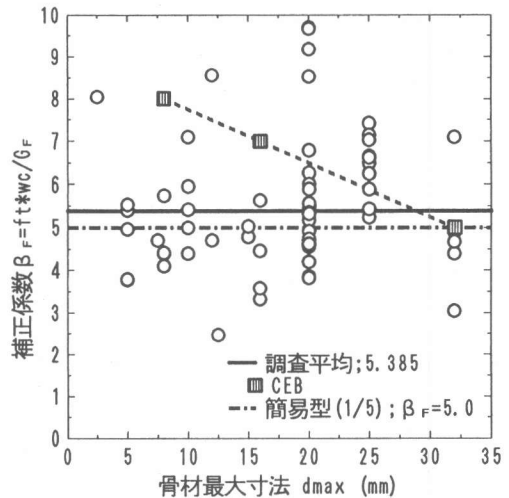


図-6 骨材最大寸法と補正係数 β_F との関係

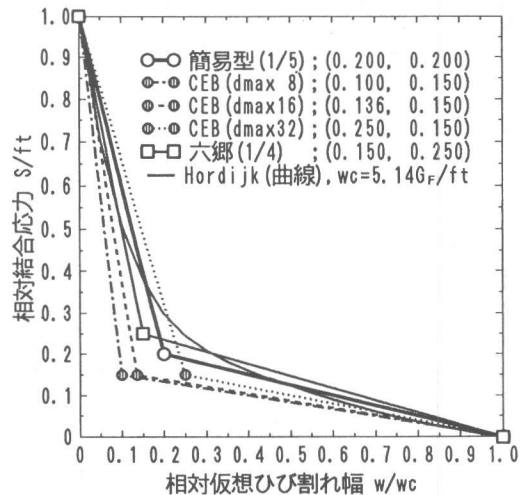


図-7 引張軟化曲線の各種モデルの比較

5. 荷重変位曲線解析結果と実測結果の比較

ここでは、評価されたバイリニア引張軟化曲線に基づく荷重変位曲線の解析結果が、実測結果とどの程度対応するか検討した。検討方法は、圧縮強度、骨材最大寸法が既知の試験体の荷重変位曲線の測定結果について、1/5モデルおよびCEB法モデルのバイリニア評価から算定されたパラメータを用い荷重-荷重点変位曲線（以下、P-LPD曲線）を解析し、両者の比較を行う。解析時の f_t と E は条件をそろえるため、すべてNewRC式を適用した。 G_F は、実測による場合と計算式による場合の2通り行った。さらに、 E のみリニア型でその他すべてCEB法に従った場合（オリジナルと表記）も比較した。

図-8に荷重-荷重点変位曲線の解析結果を示す。ここで、a)~c)は文献8)の普通強度コンクリートについて、d)~g)は文献9)の高強度コンクリートについて、各々 d_{max} が変化したときの影響を検討した。また、h)~m)は文献10)の普通強度および高強度コンクリートについて、粗骨材種類が異なる場合の影響を検討した。図中の試験体記号は引用文献に従う。

解析結果は、いずれのモデルにおいても、簡易型で評価したことを考慮し、概ね実測結果と良く対応しているといえる。特に G_F に関して、実測値を適用した場合には、どの試験条件においても軟化域の挙動の適合が良く、1/5モデルとCEBモデルとの違いは見られない。 G_F に計算値を適用した場合には、1/5モデルでは、a)図やm)図のように G_F が非常に小さい試験条件での適合性が良くないが許容範囲にあるといえる。CEBモデルでは、 d_{max} により制御される β_F 値の低減によりフォローしているため、a)図は適合するが、m)図のように高強度域において d_{max} が大きく G_F が小さい場合は対応が困難となる。すべてCEB法に従った場合は、NewRC式適用結果とあまり違いが見られない。

6. 結論

バイリニア型引張軟化曲線の破壊に関わる既

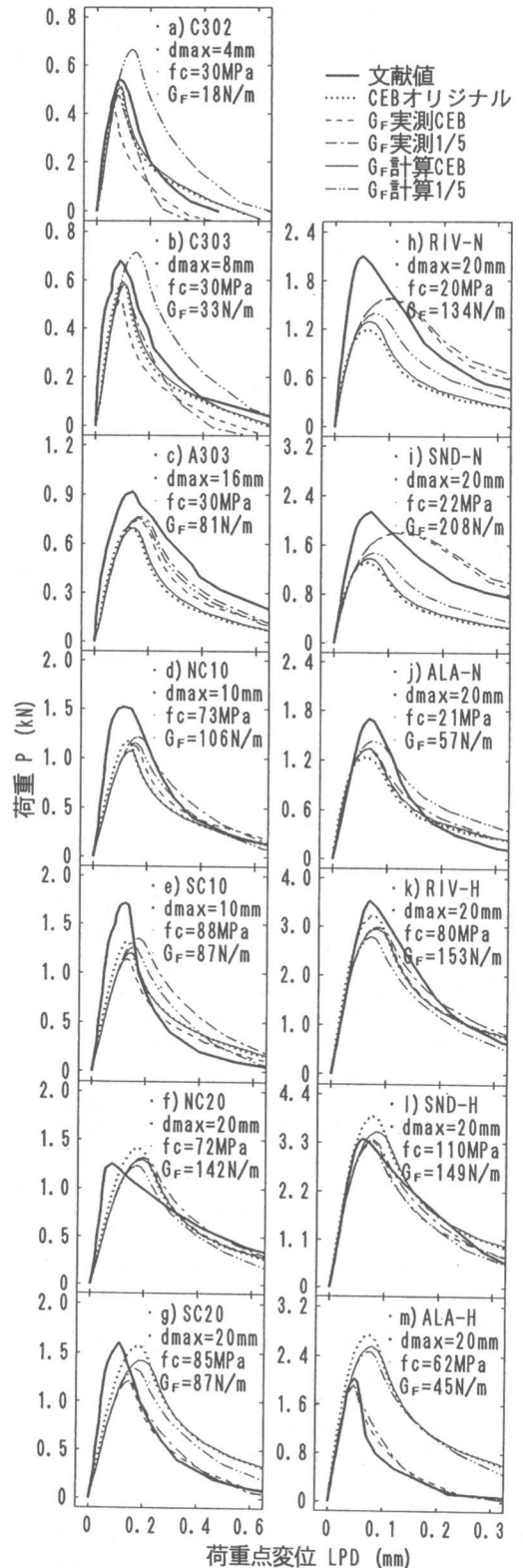


図-8 荷重-荷重点変位曲線の解析結果

往の研究を概括し、各種強度試験値と破壊エネルギーおよび引張軟化曲線の各評価パラメータとの関係を検討し、引張軟化曲線の簡易評価方法を検討した結果、以下が明らかとなった。

(1) CEB 提案の圧縮強度に基づく破壊エネルギーの推定は、高強度域において対応が悪く、回帰分析に基づく 1/3 乗関数の提案式がよい対応を示した。

(2) 骨材最大寸法に関わらず、バイリニアの相對形状は一定とした、CEB 提案よりも簡便な本推定方法により解析した荷重変位曲線は、実験結果とほぼ対応した。

謝辞

本研究は、JCI コンクリートの破壊の力学国際会議国内組織委員会、WG3 破壊メカニズムと試験法の活動の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) CEB Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft 1991, Bulletin d'Information, No.203, pp.2-1 - 2-16, July, 1991
- 2) Wittmann,F.H., Roelfstra,P.E., Mihashi,H., Huang,Y.-Y., Zhang,X.-H. and Nomura,N. : Influence of Age of Loading, Water-Cement Ratio and Rate of Loading on Fracture Energy of Concrete, Materials and Structures, Vol.20, No.116, pp.103-110, March, 1987
- 3) RILEM Draft Recommendation (50-FMC) : Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285-290, July-August, 1985
- 4) Mihashi,H. and Nomura,N. : A Method to Determine Bi-Linear Softening Diagram as a Material Law of Concrete under Tension, Advances in Building Materials Science, Research and Applications, Edited by Gerdes,A., Aedificatio, pp.59-77, 1996
- 5) 土木学会コンクリート委員会寸法効果小委員会(304) : コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線, 土木学会, コンクリート技術シリーズ No.18, pp.11-14, 1997.5
- 6) 野口貴文 : 高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する研究, 東京大学学位論文, 1995.4
- 7) 橋高義典 : 引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの弾塑性破壊パラメータの評価, 日本建築学会構造系論文集, No.469, pp.17-24, 1995.3
- 8) Hansen,T.C. : Fracture of Concrete a New Approach to Predict Crack Propagation, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2, Edited by Wittmann,F.H., Aedificatio, pp.1239-1250, 1995
- 9) Tasdemir,C., Tasdemir,M.A., Lydon,F.D. and Barr,B.I.G. : Effects of Silica Fume and Aggregate Size on the Brittleness of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.26, No.1, pp.63-68, January, 1996
- 10) 橋高義典・中村成春 : 高強度コンクリートの破壊パラメータに及ぼす粗骨材の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.490, pp.7-16, 1996.12

Appendix 1. 図-2~4の調査文献

- ① Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2, Edited by Wittmann,F.H., Aedificatio, 1995
 - 1) Brokenshire,D.R. et al. : Vol.1, pp.3-16
 - 2) Uchida,Y. et al. : Vol.1, pp.17-30
 - 3) Ulfkjaer,J.P. et al. : Vol.1, pp.31-44
 - 4) Kan,Y.-C. et al. : Vol.1, pp.111-118
 - 5) Kitsutaka,Y. et al. : Vol.1, pp.199-208
 - 6) Zhou,F.P. : Vol.1, pp.219-228
 - 7) Cornelius,H.T. : Vol.2, pp.1239-1250
- ② Materials and Structures
 - 8) Hillerborg,A. : Vol.18, No.107, pp.407-413, 1985
 - 9) Giaccio,G. et al. : Vol.26, No.161, pp.381-386, 1993
 - 10) Monterio,P.J.M. et al. : Vol.26, No.162, pp.443-452, 1993
- ③ Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, Edited by Wittmann,F.H., Elsevier, 1986
 - 11) Planas,J. et al. : pp.381-390
 - 12) Carpinteri,A. et al. : pp.423-436
- ④ Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, Edited by Mihashi,H. et al., Balkema, 1989
 - 13) Tognon,G. et al. : pp.57-71
- ⑤ Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites, Edited by Shah,S.P., Martinus Nijhoff Publishers, 1985
 - 14) Hilsdorf,H.K. et al. : pp.361-397
- ⑥ コンクリート工学論文集
 - 15) 三橋博三他 : Vol.4, No.2, Issue 8, pp.57-67, 1993.7
 - 16) 野村希晶他 : Vol.7, No.2, Issue 14, pp.119-126, 1996.7
 - 17) 破壊力学の応用研究委員会報告書, p.58, 1993.10
- ⑦ 日本建築学会構造系論文集
 - 18) 篠原保二他 : No.442, pp.13-22, 1992.12
 - 19) 橋高義典他 : No.490, pp.7-16, 1996.12
 - 20) 橋高義典他 : No.496, pp.9-15, 1997.6
- ⑧ Advanced Cement Based Materials
 - 21) Giaccio,G. et al. : Vol.7, No.2, pp.41-48, March, 1998
- ⑨ Experimental Mechanics
 - 22) Malvar,L.J. et al. : pp.266-272, September, 1988
 - 23) Swartz,S.E. et al. : pp.359-365, December, 1987
- ⑩ Cement and Concrete Research
 - 24) Jueshi,Q. et al. : Vol.27, No.7, pp.1031-1036, 1997
 - 25) Tasdemir,C. et al. : Vol.26, No.1, pp.63-68, 1996
 - 26) Zhou,F.P. et al. : Vol.25, No.3, pp.543-552, 1995

Appendix 2. 図-5&6の調査文献

- ① Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2, Edited by Wittmann,F.H., Aedificatio, 1995
 - 1) Ishiguro,S. et al. : Vol.1, pp.145-154
 - 2) Trunk,B. et al. : Vol.1, pp.607-618
- ② Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-1, Edited by Bazant,Z.P., Elsevier, 1992
 - 3) Tschegg,E. et al. : pp.455-460
- ③ 日本建築学会構造系論文報告集
 - 4) 野村希晶他 : No.416, pp.9-16, 1990.10
 - 5) 篠原保二他 : No.442, pp.13-22, 1992.12
- ④ コンクリート工学年次論文報告集
 - 6) 渡部 憲他 : Vol.15, No.1, pp.453-458, 1993.6
- ⑤ コンクリート工学論文集
 - 7) 野村希晶他 : Vol.2, No.1, Issue 3, pp.57-66, 1991.1
 - 8) 三橋博三 : Vol.6, No.1, Issue 11, pp.81-88, 1995.1
- ⑥ 材料
 - 9) 野村希晶他 : Vol.40, No.456, pp.1157-1163, 1991.9