

# 論文 無筋コンクリートはりの混合モード破壊の数値解析

栗原哲彦\*1・久家 立\*2・吉川弘道\*3・船山 哲\*4

**要旨:** 無筋コンクリートはりの混合モード破壊を, モード I 解析をもとにした数値解析により再現することを試みた. その結果, 曲げの影響が大きい場合は実験値と解析値は精度良い一致を示したが, せん断の影響が大きい場合は十分な解析結果を得ることはできなかった. モード I 解析の混合モード破壊への適用性の限界を示した. しかし, 実験で得られたひび割れ性状は, 解析において精度良く再現することができた.

**キーワード:** 混合モード破壊, モード I 解析, 引張軟化曲線, 破壊エネルギー

## 1. はじめに

コンクリート構造物は, 様々に作用する応力に対して安全に供用できるように設計が行われている. コンクリート構造物を設計するにあたっては構造物の破壊モードを設定し, それに対する安全性を確保することが重要である. 近年ではコンピュータの計算能力の大幅な進歩により, 設計に数値解析が組み込まれるようになった. しかし, 数値解析により構造物の安全性を検討する場合, 正確な破壊現象の再現が必要となる. この場合, 重要となるのが数値解析に組み込む様々な構成則の精度である.

単軸引張応力下での破壊挙動 (以下, モード I 破壊) に対しては, 破壊力学パラメータの 1 つである引張軟化曲線 (破壊領域で増大するひび割れ幅と引張伝達応力との関係) を数値解析に組み込むことより, 精度良い解析が行えるようになった. しかし, 通常, コンクリート構造物は複合応力下にあり, その破壊挙動 (以下, 混合モード破壊) は極めて複雑な非線形現象である. こうした混合モード破壊を引張軟化曲線のようなモード I 破壊に基づいた破壊パラメータのみで説明するのは困難であろうと予測される. また, コンクリートの混合モード破壊に関

しては種々の研究<sup>1,2,3)</sup>がなされてきたが, その破壊を特徴づける破壊パラメータの推定は困難であり, そのための試験法も標準化されていないのが現状である. 混合モード破壊に関しては, 今後, その定義とともに混合モード破壊を再現できる引張軟化曲線以外の破壊パラメータの抽出やそのパラメータを得るための標準試験法等について検討していく必要がある.

本研究では, その第一段階として混合モード破壊の破壊性状を実験的に検討し, モード I 解析 (曲げ解析に基づく引張軟化曲線を考慮した解析) をベースにした数値解析により混合モード破壊を再現することを試みた. さらに, モード I 解析の混合モード破壊への適用限界について検討した.

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の概要

普通コンクリートを用い, はり供試体 (幅 100 × 高さ 100 × 長さ 400mm) を作製した. 表-1 に

表-1 コンクリートの示方配合

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     | Ad1 (cc) | Ad2 (cc) |
|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|----------|----------|
|         |         | W                       | C   | S   | G   |          |          |
| 55      | 47      | 157                     | 286 | 833 | 999 | 715      | 28.6     |

Ad1: AE 減水剤, Ad2: 補助 AE 剤

\* 1 武蔵工業大学講師 工学部土木工学科 博士 (工学) (正会員)  
 \* 2 武蔵工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)  
 \* 3 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)  
 \* 4 トータルインフォメーションサービス (正会員)

表-2 供試体の寸法諸元

| 供試体名  | 断面力比*1 | 供試体寸法(mm) |     |     | 荷重点-支点間距離*2<br>(mm) | 供試体本数<br>(本) |
|-------|--------|-----------|-----|-----|---------------------|--------------|
|       |        | 幅         | 高さ  | 長さ  |                     |              |
| Mix31 | 3:1    | 100       | 100 | 400 | 30                  | 3            |
| Mix51 | 5:1    |           |     |     | 50                  | 4            |
| Mix71 | 7:1    |           |     |     | 70                  | 4            |

\*1 リガメント部の曲げモーメントとせん断力との比

\*2 図-1に示す a の値

表-3 材料特性

| 強度(N/mm <sup>2</sup> ) |      |      | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 材齢<br>(日) |
|------------------------|------|------|--------------------------------|-----------|
| 圧縮                     | 引張   | 曲げ   |                                |           |
| 40.0                   | 3.39 | 5.73 | 34.3                           | 90        |

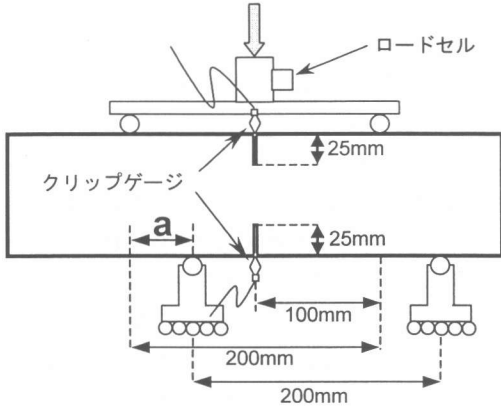


図-1 載荷試験概略図

コンクリートの示方配合を、作製したはり供試体の寸法諸元を表-2に示す。さらに、試験時材齢におけるコンクリートの材料特性を表-3に示す。供試体中央にひび割れを誘発させるためにコンクリートカッターにより、はり中央の上下部に幅3mm、深さ25mmの切欠きを設けた。はり供試体は、脱型後試験直前まで20℃の水中養生とした。

なお、破壊エネルギー $G_F$ を推定するために、中央に切欠き(幅3mm、深さ50mm)を設けた曲げ供試体(100×100×400mm)も作製した。

## 2.2 載荷方法

はり供試体を混合モード破壊させるために、載荷方法はルーマニア試験法を採用した。図-1に載荷試験の概略図を示す。リガメント部の作用断面力状態を変化させるために、載荷点位置と支点位置の距離を30, 50, 70mmと変化させた。載荷点位置と支点位置の距離30, 50, 70mmは、それぞれリガメント部の曲げモーメント(M)とせん断力(S)との比(以下、単に断面力比)で

3:1, 5:1, 7:1に相当する。載荷は、手動式油圧ジャッキにより行い、最大荷重以降は、急激な破壊が進行しないように必要に応じて徐荷・再載荷を繰り返した。載荷試験は、はり供試体が湿潤状態の下で行った。計測項目は、荷重およびはり供試体の上下切欠き口の開口変位(以下、上部CMOD, 下部CMOD)とし、それぞれロードセル(容量5kN)とクリップゲージ(感度1/1000mm)により測定した。

破壊エネルギー $G_F$ を推定するため、3点曲げ載荷試験を実施し、荷重および切欠き肩口開口変位(以下、CMOD)の計測を行った。

## 3. 解析概要

### 3.1 破壊エネルギーの推定

破壊エネルギー $G_F$ はJCIの「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(橋高 義典 委員長)」において提案された「ブレンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案)」<sup>4)</sup>に従い算出した。試験で得られた荷重-CMOD曲線から式(1)により破壊エネルギー $G_F$ を算出した。式(1)は、はり供試体の変形モードを、破断面上縁を中心とした剛体回転として、CMODを載荷点変位に換算して荷重のなす仕事量をもとめ、破壊エネルギー $G_F$ を算出する式である。その結果、 $G_F$ は、0.101N/mm<sup>2</sup>であった。

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (1)$$

$$W_1 = 0.75 \left( \frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_c \quad (2)$$

ここで、 $G_F$ : 破壊エネルギー(N/mm)、 $W_0$ : 荷重-CMOD曲線の面積(N・mm)、 $W_1$ : 供試体の自

表-4 解析ケースの詳細

| ケース  | 破壊エネルギー<br>(N/mm) | 破壊基準       | 特徴  |
|------|-------------------|------------|---|
| 解析 1 | 0.101             | 2 軸主応力破壊基準 | 要素幅を考慮し、引張軟化曲線をモデル化                         |
| 解析 2 | 0.101             | 2 軸主応力破壊基準 | 破壊領域の幅を考慮し、引張軟化曲線をモデル化                      |
| 解析 3 | 引張場               | 2 軸主応力破壊基準 | ひび割れ要素の応力場を Mohr の応力円より判定<br>(引張場 or せん断場). |
|      | せん断場              |            |   |

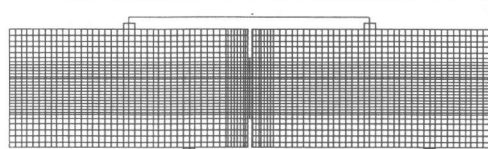


図-2 要素分割図

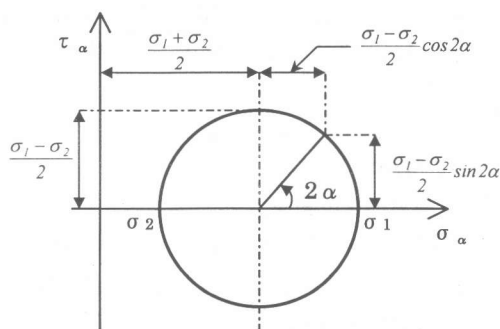
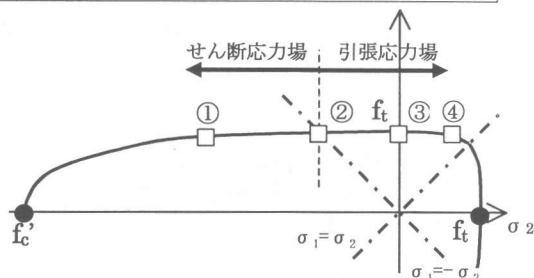
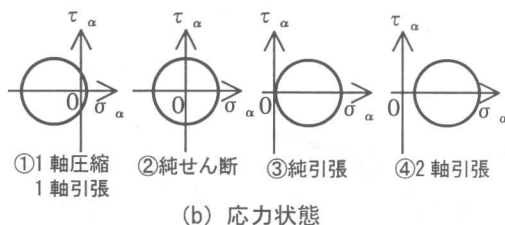


図-3 Mohr の応力円



(a) 2 軸主応力破壊基準



(b) 応力状態

図-4 2 軸主応力破壊基準と応力状態との関係

重および荷重治具がなす仕事(N・mm),  $A_{lig}$  : リガメント面積(mm<sup>2</sup>),  $m_1$  : 供試体の重量(kg),  $S$  : 荷重スパン(mm),  $L$  : 供試体長(mm),  $m_2$  : 試験機に取り付けられておらず、破断するまでに供試体に載っている治具の質量(kg),  $g$  : 重力加速度(9.807m/s<sup>2</sup>),  $CMOD_c$  : 破断時のひび割れ開口変位(mm)

### 3.2 混合モード破壊の数値解析

コンクリートの混合モード破壊を汎用有限要素コード「Total-RC」を用いて再現することを試みた。「Total-RC」はコンクリートのひび割れモデルに分布ひび割れモデルを用いており、実験より推定された  $G_f$  から式(3)により引張軟化曲線をモデル化し考慮することができる。式(3)中の  $\eta$  は式(4)により算出され、破壊エネルギーの等価性から要素寸法の非依存性を導くものである<sup>5)</sup>。

$$\sigma(\varepsilon) = f_t \eta^{\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cr}}{\varepsilon_f}} \quad (3)$$

$$\eta = \exp \left\{ -\varepsilon_f \left( \frac{G_f}{l_e f_t} \right)^{-1} \right\} \quad (4)$$

ここで、 $\sigma(\varepsilon)$  : 伝達応力(N/mm<sup>2</sup>),  $f_t$  : 引張強度(N/mm<sup>2</sup>),  $\eta$  : 低減率,  $\varepsilon$  : 平均ひずみ,  $\varepsilon_{cr}$  :  $f_t$  時のひずみ,  $\varepsilon_f$  : 基準ひずみ,  $G_f$  : 破壊エネルギー(N/mm),  $l_e$  : 要素寸法(mm)

数値解析は、以下の3ケースについて行った。各解析ケースの詳細を表-4に示し、要素分割図を図-2に示す(支点、荷重点は断面力比が5:1の場合)。

解析1は、式(3)、式(4)を用いて引張軟化曲線をモデル化する際に、有限要素1要素幅を考慮したケースである。

解析2は、解析1の結果(後述)から、引張軟化曲線をモデル化する際に、破壊領域の幅を考慮したケースである。解析1において混合モード下のひび割れはある幅を持った領域で表現された。解析2はこの幅を利用したものである。

解析3は、ひび割れを生じた要素に対し引張

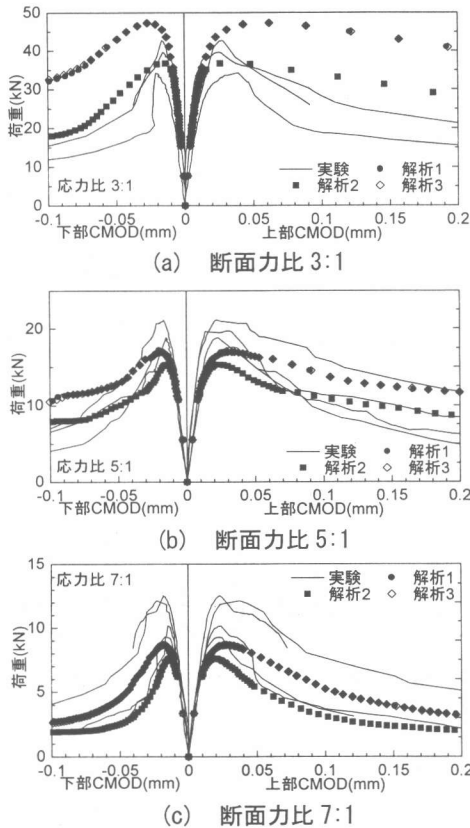


図-5 荷重-上下部 CMOD 曲線

応力場かせん断応力場かのどちらであるのかを判定し、それぞれ異なる引張軟化特性を適用するケースである。要素の応力場を判定する方法は、要素の最大主応力と最小主応力により決定される Mohr の応力円 (図-3 参照) の中心位置が負の場合をせん断応力場とし、正(ゼロを含む)の場合を引張応力場とするものである (図-4 参照)。今回は本手法の有効性を検証するため、引張応力場での引張軟化特性は、解析 1 と同様とし、せん断応力場での引張軟化特性は、破壊エネルギーを 90% 低減してモデル化した引張軟化曲線を用いた。

なお、混合モード解析におけるせん断剛性は、すべてのケースで通常曲げ解析に用いられるせん断剛性を採用した。また、各ケースの手法により引張軟化曲線をモデル化し通常曲げ解析を行ったところ、曲げ試験結果の荷重-CMOD 曲線を再現できる十分な精度が得られている。

表-5 実験結果

| 断面力比 | ケース  | 最大荷重 (kN) | 最大荷重時        |              |
|------|------|-----------|--------------|--------------|
|      |      |           | 上部 CMOD (mm) | 下部 CMOD (mm) |
| 3:1  | 実験   | 38.8      | 0.0302       | 0.0177       |
|      | 解析 1 | 47.3      | 0.0620       | 0.0270       |
|      | 解析 2 | 36.7      | 0.0260       | 0.0140       |
|      | 解析 3 | 47.3      | 0.0620       | 0.0270       |
| 5:1  | 実験   | 19.3      | 0.0273       | 0.0185       |
|      | 解析 1 | 17.0      | 0.0330       | 0.0190       |
|      | 解析 2 | 15.3      | 0.0250       | 0.0150       |
|      | 解析 3 | 17.0      | 0.0330       | 0.0190       |
| 7:1  | 実験   | 11.0      | 0.0268       | 0.0179       |
|      | 解析 1 | 8.68      | 0.0270       | 0.0180       |
|      | 解析 2 | 7.61      | 0.0190       | 0.0140       |
|      | 解析 3 | 8.68      | 0.0270       | 0.0180       |

#### 4. 実験結果

##### 4.1 荷重-変位関係

図-5 に実験で得られた荷重-上下部 CMOD 曲線 (実線) を示す。最大荷重および最大荷重時の上下部 CMOD を表-5 に示す。なお、開口方向を正值とし、閉口方向を負値とした。断面力比が 7:1 から 3:1 に変化するには最大荷重が大きくなった。つまり、相対的にせん断の影響が大きいほど最大荷重が大きくなった。最大荷重以降の軟化勾配を見ると、上部 CMOD (開く方向) の方が、軟化勾配が緩やかであった。また、最大荷重時の上下部 CMOD は、いずれも上部 CMOD で 0.03mm 程度、下部 CMOD で 0.02mm 程度であり、断面力比の影響は認められなかった。

##### 4.2 ひび割れ性状

図-6 の上段に、実験後の破壊状況の一例を示す。他の供試体においても同様の破壊性状を示した。いずれの供試体においてもひび割れは、リガメント付近に集中し、リガメント付近以外でのひび割れは確認されなかった。供試体に発生したひび割れは、発生初期は上部切欠き先端から近接支点方向に進展した。その後リガメント高さ中央付近で下部切欠き先端方向に回転し、最終的に下部切欠き先端へと進展した。つまり、大きく迂回する性状を示した。この性状は、いずれの供試体においても確認された。しかし、

断面力比が 3:1 から 7:1 になるにしたがい、ひび割れは上下部切欠き先端を結ぶ鉛直方向に進展する傾向が確認された。これは相対的にせん断の影響が小さくなり、曲げひび割れに近づいたためと考えられる。

## 5. 解析結果

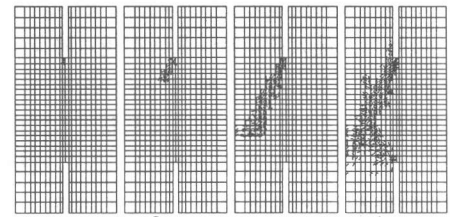
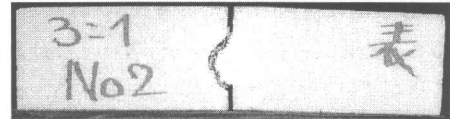
### 5.1 荷重-変位関係の比較

図-5 に解析により得られた荷重-上下部 CMOD 曲線 (解析 1: ●, 解析 2: ■, 解析 3: ◇) を併記する。

解析 1 は、断面力比が 5:1 のとき最大荷重の解析値は実験値のバラツキの範囲内にあり、良い一致を示した。これに対し、断面力比が 7:1 の場合は、最大荷重の解析値は実験値の下限値に近い値をとった。また、断面力比が 3:1 の場合は、最大荷重の解析値は実験値を大幅に上回った。また、最大荷重点以降の勾配については断面力比 7:1 の場合は実験値と良い一致を示したが、他の場合は解析値の方が緩やかとなった。これは、断面力比 7:1 では曲げによる影響が大きく、引張軟化曲線を考慮したモード I 解析をベースとした数値解析でも対応できると考えられる。しかし、断面力比 3:1 のようにせん断の影響が大きくなると最大荷重および最大荷重点以降の勾配ともに解析 1 では対応できないことが分かる。

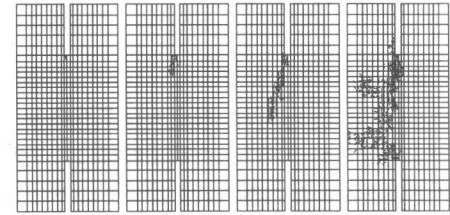
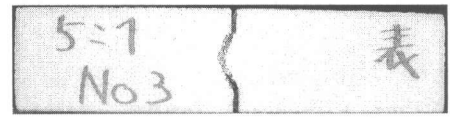
解析 2 では、破壊領域の幅を考慮することによりどの断面力比のケースについても解析 1 に比べ最大荷重の解析値が小さくなった。しかし、断面力比 3:1 においては、最大荷重は実験値のバラツキの範囲内に収まったが、他の場合は、解析値は実験値に対して過小評価している。また、最大荷重以降の勾配は解析 1 の場合と同様のことが言える。

解析 3 では、解析 1 をもとに Mohr 円の概念を適用し、要素の応力場の特性を判断することにより破壊領域の局所化を試みたが、荷重-上下部 CMOD 曲線の挙動は解析 1 と同一のものとなった。これは、せん断応力場と判定された要素数



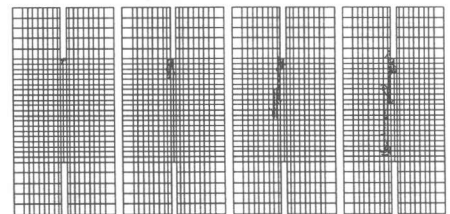
①  $\frac{1}{3}P_{\max}$    ②  $\frac{2}{3}P_{\max}$    ③  $P_{\max}$    ④  $\frac{1}{2}P_{\max}$

(a) 断面力比 3:1



①  $\frac{1}{3}P_{\max}$    ②  $\frac{2}{3}P_{\max}$    ③  $P_{\max}$    ④  $\frac{1}{2}P_{\max}$

(b) 断面力比 5:1



①  $\frac{1}{3}P_{\max}$    ②  $\frac{2}{3}P_{\max}$    ③  $P_{\max}$    ④  $\frac{1}{2}P_{\max}$

(c) 断面力比 7:1

図-6 ひび割れ性状 (上: 実験, 下: 解析)

が少なかったためと考えられ、応力場の判定基準の見直しが必要である。また、Mohr 円の概念をコンクリートに適用した点、およびせん断応力場における破壊エネルギーを低減した点についても継続的な検討が必要であると考えられる。

## 5.2 ひび割れ性状の比較

図-6の下段に、解析1により得られたひび割れ図(リガメント付近の拡大)を併記する。また、左から、最大荷重の1/3の時点、最大荷重の2/3の時点、最大荷重時、最大荷重以降荷重が最大荷重の1/2となった時点の4つを示す。

ひび割れ図からは、各解析により若干の変化があるものの大きな差異は認められない。解析3で破壊領域の局所化を試みているものの、ひび割れ図においても大きな効果は見られなかった。しかし、ひび割れが迂回する点に限れば、解析で得られたひび割れ図は、実験のひび割れ性状を再現しているものと言える。断面力比7:1のひび割れ(鉛直方向に直線的に進展)についても再現されている。

## 6. まとめ

無筋コンクリートはりの混合モード破壊を、モードI解析をベースにした数値解析により再現することを試みた。得られた結果を以下にまとめる。

(1)リガメント部の曲げモーメント(M)とせん断力(S)との比が3:1, 5:1, 7:1と変化すると、相対的に曲げの影響が大きくなるため、ひび割れは鉛直方向に直線的に進展した。

(2)モードI解析をもとに破壊エネルギーに対して要素幅のみを考慮した解析1では、曲げの影響が大きい場合については対応できるが、せん断の影響が大きい場合は十分な解析結果を得ることはできなかった。

(3)破壊エネルギーに対して、要素幅を考慮(解析1)するのではなく、破壊領域の幅を考慮(解析2)することにより、断面力比3:1においては、最大荷重は実験値のバラツキの範囲内に収まったが、他の場合は、解析値は実験値に対して過小評価することが分かった。

(4)Mohr円の概念をコンクリートに適用し、破壊領域の局所化を試みた解析3は、解析1と同様の挙動を示し、解析精度の向上には至らなかった。

(5)3ケースの解析を行ったが、ひび割れ領域の完全な局所化は不可能であった。しかし、ひび割れが迂回する点および曲げの影響が相対的に大きい(断面力比7:1)とひび割れは鉛直方向に直線的に進展する点は再現できた。

以上、せん断の影響が大きい場合、実験値と解析値との一致性は悪く、モードI解析の適用性に限界があった。今後、①要素の応力場判定基準の見直し、②混合モード破壊に対する有効なパラメータの推定、を進め、継続的な議論が必要であると考えます。

## 参考文献

- 1) J.C. Galvez, D.A. Cendon, J. Planas, G.V. Guinea and M. Elices : Fracture of concrete under Mixed loading. Experimental Results and Numerical Prediction, Fracture Mechanics of Concrete Structures(ed. H. Mihashi and K. Rokugo), AEDIFICATIO, pp. 729-738, 1998
- 2) J. Alfaiate and E.B. Pires : Mode I and Mixed Mode Non-prescribed Discrete Crack Propagation in Concrete, Fracture Mechanics of Concrete Structures (ed. H. Mihashi and K. Rokugo), AEDIFICATIO, pp. 739-748, 1998
- 3) V.O. Garcia-Alvarez, R. Gettu and I. Carol : On Non-planar Fracture in Concrete, Fracture Mechanics of Concrete Structures(ed. H. Mihashi and K. Rokugo), AEDIFICATIO, pp. 749-759, 1998
- 4) JCI「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」: プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案) (<http://c-pc8.civil.musashi-tech.ac.jp/teacher/jci-fm/index.html>)
- 5) 吉川弘道, 西藤 厚, 金刀督純: 引張強度の空間的変動を考慮したコンクリートのFEM破壊シミュレーション, コンクリート工学論文集, 第7巻, 第2号, pp. 103-117, 1996